

Indoor GPS: Ist der Satellitenempfang in Gebäuden möglich?

Bernd Eissfeller, Andreas Teuber, Universität der Bundeswehr München

Peter Zucker, SiRF Technology GmbH

Zusammenfassung

GPS Signale, die eine Wand durchdringen, werden in Abhängigkeit von den Baumaterialien zusätzlich um den Faktor 100 und mehr gedämpft. Gegenüber einem Outdoor Empfänger, der das Signal innerhalb weniger Sekunden akquirieren kann, benötigt derselbe Empfänger unter den Bedingungen des Innenraumes sehr viel länger, um das Nutzsignal im Rauschen zu erkennen. Er müsste hierbei durchaus über mehrere Minuten mitteln, um zu einem brauchbaren S/N zu kommen. Lange Wartezeiten sind jedoch für den Nutzer nicht zumutbar. Die Standardlösung zum Problem der Akquisition unter Indoor Bedingungen setzt sich immer aus zwei Teilansätzen zusammen: Assistenz durch ein Mobilfunknetz und Parallelisierung des Rechenprozesses bei der Satellitensuche durch eine Blockkorrelation. Letztere kann im Zustandsraum (massiv parallel) oder Frequenzraum (FFT) erfolgen. Durch diese beiden Maßnahmen kann zum einen der Suchbereich, meistens die Frequenzunsicherheit, verkleinert werden, zum anderen die Rechenleistung des Empfängers bei der Korrelation um einen Faktor 500 und mehr gesteigert werden. In dem Papier werden die physikalischen Randbedingungen und technischen Realisierungen der GPS Indoor Ortung beschrieben.

Einleitung

Indoor GPS ist eine relative junge Erweiterung der bereits sehr ausgereiften GPS Verfahren außerhalb von Gebäuden. Der Charme der GPS basierten Indoor Ortung liegt im Vergleich zu anderen Konkurrenztechnologien (GSM Mikrozellen, WLAN, DECT, GPS Pseudolites) darin, dass keine zusätzliche Infrastruktur in Gebäuden implementiert werden muss. Ausgangspunkt für diese Entwicklung ist der Einbau einer Ortungsfunktion in Mobiltelefone beim Notruf E-911 in den USA. Jeder abgesetzte Notruf soll dort nach einem Mandat der FCC (Federal Communication Commission, siehe *FCC, Home Page*) in Zukunft mit einer bestimmten Genauigkeit automatisch geortet werden:

- 67% der E-911 Anrufer mit ± 50 m Genauigkeit
- 95% der E-911 Anrufer mit ± 150 m Genauigkeit

E-911 muss selbstverständlich auch in Gebäuden funktionieren.

Es gibt eine Vielzahl weiterer Anwendungen von Interesse, die eine Ortung im Innenraum benötigen: E-Commerce, Überwachung von Kindern und älteren Personen, Feuerwehr, Militär, Überwachung von Fahrzeugen in Tiefgaragen.

In Europa gibt es Überlegungen den Notruf E-112 ähnlich auszustatten (*Europäische Kommission, 1999*).

Die Anfänge der Indoor Ortung gehen mit der Untersuchung von externer Doppler- und Ephemeridenstützung bereits in die achtziger Jahre zurück (*Taylor & Sennott, 1981*). Die Übermittlung von gemessenen Pseudostrecken von einer Mobileinheit zu einer Zentrale mit Positionierung in der Zentrale wurde bereits von Navysis (*Navysis, 1991*) als Patent angemeldet. Die eigentliche Indoor Ortung im Sinne eines GPS Empfängers mit stark gesteigerter Empfindlichkeit wurde von der USCG Akademie (*,1997*) und von SnapTrack (*,1998*) auf der Basis einer Fast Fourier Transformation (FFT) demonstriert. GPS Indoor taugliche Chip-Sätze sind seit 2001 auf dem Markt: Global Locate A-GPS Chip mit 16.000 Korrelatoren, SnapTrack GPSTOne™ A-GPS Chip, SiRFStar II™ und III™, letzterer mit 200.000 äquivalenten Korrelatoren für 2004 angekündigt.

Der Empfang von GPS Signalen in einer Tiefgarage galt nach der herrschenden Lehrmeinung jahrelang als unmöglich. Hier handelt es sich jedoch um eine Fehleinschätzung, bei der angenommen wird, dass die kommerziell erhältliche Empfängertechnik die ultimative Antwort auf die physikalischen Randbedingungen ist. Dies ist natürlich insbesondere im Low-Cost Bereich nicht der Fall, da hier beliebig viele Dezibel an Empfindlichkeit zugunsten einer billigen Lösung verschenkt werden. Die Ausbreitungsphysik einer elektromagnetischen Welle des GPS im L – Band sagt eindeutig aus, dass obwohl die bereits sehr niedrigen GPS Außenraumsignalpegel beim Eintritt in ein Gebäude nochmals erheblich reduziert werden, ein messbarer Signalpegel in jedem Fall auch in der Tiefgarage vorhanden ist. Die zusätzlich auftretende Dämpfung muss durch eine entsprechende Steigerung der Rechenleistung im Vergleich zum Standardempfänger ausgeglichen werden. Der begrenzende Faktor der Indoor Ortung ist somit nicht der Signalpegel selbst, sondern die maximal mögliche Rechenleistung eines ASICs. Diese wird im Wesentlichen durch den Entwicklungsstand der Halbleitertechnik festgelegt.

Indoor Umgebung

Die zusätzliche Dämpfung, die ein GPS Signal beim Durchtritt durch eine Wand erfährt, hängt von den elektrischen Eigenschaften des Baustoffes ab, aus dem das Bauelement hergestellt ist. Wie weiter unten gezeigt wird, sind GPS Signale im Inneren eines Gebäudes um 20 – 30 dB (Faktor 100 – 1000) schwächer als im Außenraum. Bei der realen Wellenausbreitung wird diese Dämpfungsproblematik

aufgrund der Mehrwegeausbreitung, Beugung und Brechung etwas entschärft, da durch diese Phänomene die Welle auch auf alternativen Wegen in einen Innenraum eindringen kann.

Der Dämpfungsmechanismus lässt sich wie folgt physikalisch beschreiben:

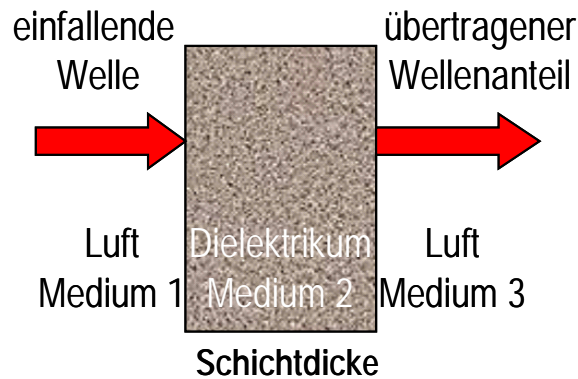


Abb. 1: Dämpfung einer elektromagnetischen Welle beim Durchtritt durch ein dichter Medium

$$P = P_0 - L_{GES} \quad (1)$$

$$L_{GES} = L_{FR} + L_D + L_T$$

- P: Indoor-Empfangsleistung
 P₀: Outdoor-Empfangsleistung
 L_{GES}: Gesamtdämpfung
 L_{FR}: Freiraumdämpfung
 L_D: Durchdringungsdämpfung
 L_T: Transmissionsdämpfung

Wie man erkennt, setzt sich die Dämpfung der Welle beim Durchtritt durch ein Dielektrikum (hierunter fallen die meisten Baustoffe) aus drei Anteilen (*Michler & Strey, 1998*) zusammen: Die Freiraumdämpfung ist durch den zusätzlichen Weg durch die Schicht gegeben und kann bei dünnen Schichten vernachlässigt werden. Die Durchdringungsdämpfung beschreibt die Abschwächung der Amplitude beim Durchgang durch das Medium. Sie ist abhängig von den Dielektrizitätskonstanten der beteiligten Medien, der Wellenlänge und der Schichtdicke. Die Transmissionsdämpfung ist eine zusätzliche Dämpfung, die sich durch die Wechsel an den Grenzschichten der Medien ergibt. Sie hängt ebenfalls von den Dielektrizitätskonstanten der Medien ab.

Material	Dämpfung bei L1 = 1.500 MHz	
	[dB]	Faktor [-]
Trockenwand	1	0,8
Sperrholz	1 - 3	0,8 – 0,5
Glas	1 - 4	0,8 – 0,4
Getöntes Glas	10	0,1
Bauholz	2 - 9	0,6 – 0,1

Matte aus Eisen	2 - 11	0,6 – 0,08
Dachziegel / Ziegelstein	5 - 31	0,3 – 0,001
Beton	12 - 43	0,06 – 0,00005
Stahlbeton / Eisenbeton	29 - 33	0,001 – 0,0005

Tabelle 1 : Gesamtdämpfung L_{GES} von verschiedenen Baumaterialien im L – Band
In Tabelle 1 werden charakteristische Dämpfungen für das L-Band von gebräuchlichen Baustoffen angegeben (Stone, 1997). Für einige Bauwerke lassen sich demzufolge die folgenden Dämpfungen für das L-Band abschätzen:

- Wohnhäuser: 5 bis 15 dB
- Historische Gebäude: 25 bis 35
- Bürogebäude: 30 dB
- Tiefgaragen: > 30 dB

Theorie der Indoor Ortung mit GPS

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen der Indoor Signalverarbeitung diskutiert. In Abb. 2 ist ein Blockdiagramm der wesentlichen Elemente eines Indoor Empfängers dargestellt.

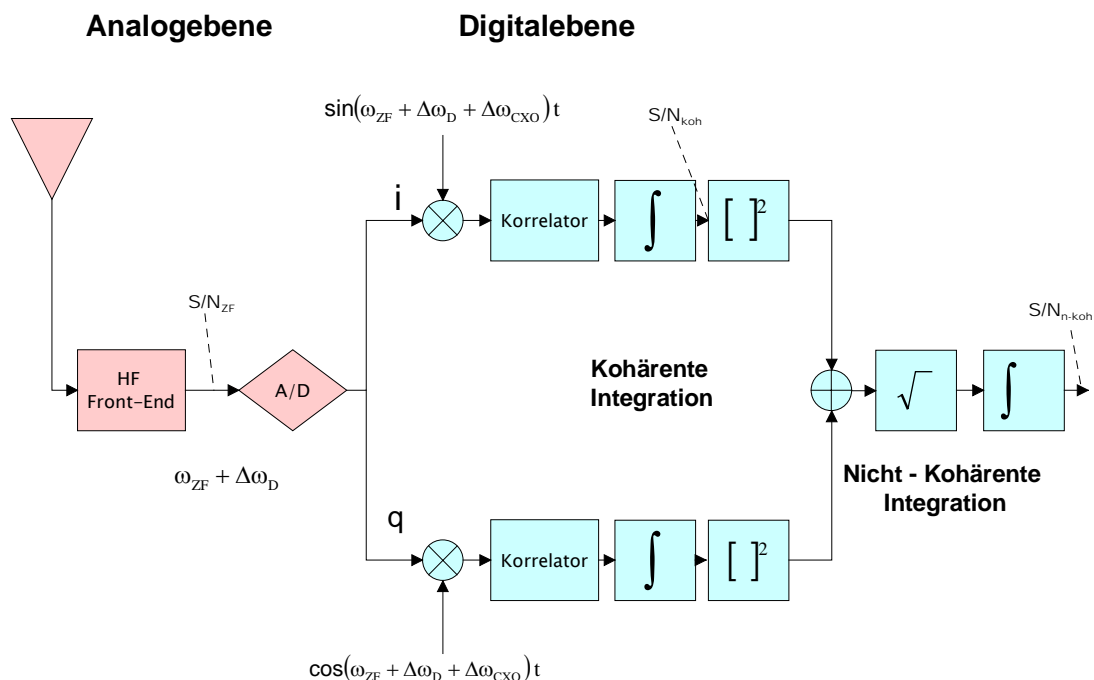


Abb. 2: Signalfluss in einem Indoor Empfänger

Das analoge C/A-Kode GPS Signal wird mit einer Antenne auf 1.575,42 MHz empfangen, im HF-Teil auf eine Zwischenfrequenz (< 100 MHz) heruntergemischt und gefiltert und anschließend A/D-gewandelt. Das Signal-zu-Rauschverhältnis S/N_{ZF} auf ZF-Ebene liegt dicht bei Null (< 0,01), d.h. das GPS Signal ist tief im Rauschen

verborgen. Der Digitaldatenstrom wird mit sin- und cos-artigen Referenzsignalen multipliziert, wodurch zwei Komponenten (I, Q) entstehen. Anschließend werden I und Q mit den Referenzcodes korreliert und über ein Zeitintervall T (kohärent) integriert. In Abhängigkeit von der Dauer der kohärenten Integrationszeit T entsteht ein S/N_{koh} , das grösser als Eins ist (1,5 typisch). Beim Outdoor Einsatz liegt dieser Wert bereits bei 6,5, was ausreicht, um das Signal sicher zu akquirieren. Im Indoor Szenario muss deshalb noch ein zweiter Integrationsprozess (nicht-kohärent) über die Zeit nachgeschaltet werden, um zu einem ausreichend großen $S/N_{\text{n-koh}}$ von mindestens 5,0 zu gelangen. Bei der kohärenten Integration nimmt man an, dass sich die Phase des Signals im Integrationsintervall nicht ändert. Vor Ausführung der nicht-kohärenten Integration, die bei Indoor durchaus über 1 s gehen kann, ist es erforderlich, i und q zunächst zu quadrieren, dann aufzuaddieren und die Wurzel zu ziehen. Hierdurch werden Phasenfehler und Navigationsdatenbit beseitigt.

Die nach der kohärenten Integration entstehenden Signale I, Q lassen sich wie folgt darstellen

$$\begin{aligned} I_k &= \sqrt{2n} \frac{S}{N_{ZF}} D_k \frac{\sin(\pi \Delta f_k T)}{(\pi \Delta f_k T)} R(\Delta \tau_k) \cos(\Delta \phi_k) + \eta_k \\ Q_k &= \sqrt{2n} \frac{S}{N_{ZF}} D_k \frac{\sin(\pi \Delta f_k T)}{(\pi \Delta f_k T)} R(\Delta \tau_k) \sin(\Delta \phi_k) + \xi_k \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{S}{N_{ZF}} = \sqrt{\frac{C}{N_0 B_{ZF}}} \quad (3)$$

S/N_{ZF} ... Signal-zu-Rauschverhältnis auf Zwischenfrequenzebene

n ... Zahl der Samples bei kohärenter Integration

C/N_0 ... Verhältnis Träger zu Rauschleistung in 1 Hz Bandbreite

B_{ZF} ... Zwischenfrequenz Bandbreite im Front – End

D_k ... Navigationsdatenbit

$R(\Delta \tau_k)$... Auto-Korrelationsfunktion des C/A – Codes: $R(x) = 1 - \frac{|x|}{T_c}$

T_c ... Chip-Länge des Kodechips

Δf_k ... Frequenzfehler

$\Delta \tau_k$... Laufzeitfehler

$\Delta \phi_k$... Phasenfehler

η_k, ξ_k ... Rauschkomponenten(AWGN), $E\{\eta_k\} = E\{\xi_k\} = 0$, $E\{\eta_k^2\} = E\{\xi_k^2\} = 1$

T ... Kohärente Integrationszeit $T = n T_s$, T_s Sampling – Zeitintervall

k ... k-tes kohärentes Integrationsintervall (Zeitzähler)

Bei Integration über $T = 0.001$ s (typisch für Outdoor) ergibt sich $n = 1023$, bei Integration über $T = 0.020$ s (typisch für Indoor) ergibt sich $n = 20.460$. Für das Signal-zu-Rauschverhältnis nach dem kohärenten Integrationsschritt ergibt sich:

$$\frac{S}{N_{\text{koh.}}} = \sqrt{2n} \frac{S}{N_{ZF}} \quad (4)$$

Man erkennt hieran das Grundprinzip zur Erreichung eines höheren S/N bei GPS. Dieses besagt, dass durch das Integrieren des Signals über die Zeit (Zahl der Samples) eine Verstärkung proportional zu $\sqrt{2n}$ erzielt werden kann. Wie weiter unten noch dargelegt wird, kann die Integrationszeit nicht beliebig lang werden. Die Signale I_k , Q_k können aus zwei Gründen zu Null werden: Einmal kann die Auto-Korrelationsfunktion in Abhängigkeit des Laufzeitfehlers zu Null werden, zum anderen kann ein großer Frequenzfehler in der sinc - Funktion im Zusammenspiel mit einer längeren Integrationszeit T zu einer kleinen Signalamplitude führen. Weil der Phasenfehler $\Delta\phi_k$ vor der Akquisition zwischen 0 und 2π liegen kann, ist es sinnvoll, die beiden Komponenten I und Q mitzuführen, da in beiden Komponenten zusammen unabhängig vom Quadranten immer die gesamte Leistung vorhanden ist. Bei der nicht-kohärenten Integration werden die Signale quadriert, weiter gemittelt und über m Samples aufsummiert:

$$y^2 = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (I_k^2 + Q_k^2)$$

$$y = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (I_k^2 + Q_k^2)}$$
(5)

Das kohärente S/N kann durch diesen Rechengang weiter verbessert werden:

$$\frac{S}{N_{n-koh.}} = \frac{y}{\sigma_N} = \sqrt{m} \frac{S}{N_{koh.}} S_L$$
(6)

$S/N_{n-koh.}$ Signal-Rauschverhältnis nach nicht-kohärenter Integration
 m Anzahl der nicht-kohärenten Integrationsschritte
 S_L Quadrierverlust angewendet auf $(S/N)_{koh.}$
 $S/N_{koh.}$ Signal-Rauschverhältnis nach kohärenter Integration
 (Eingangswert für nicht-kohärente Integration)

Parameter	Outdoor	Indoor
C	$10^{-15.6} \text{ W}$	$10^{-18.0} \text{ W}$
$N_0 = k_B T_{sys}$ $T_{sys} = 371^\circ \text{ K}$ $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$	$5.12 \cdot 10^{-21} \text{ J}$	$5.12 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
B_{ZF}	$2.4 \cdot 10^6 \text{ Hz}$	$2.4 \cdot 10^6 \text{ Hz}$
S/N_{ZF}	0.14	0.01
Integrationszeit T	0.001 s	0.020 s
Kohärente Samples n	1023	20460
Implementierungsverlust	0.8	0.8
$S/N_{koh.}$	5.2	1.4
Nicht-kohärente Samples m		50
Quadrierverlust		0.55
$S/N_{n-koh.}$		5.4

Tabelle 2: Parameter für Indoor und Outdoor GPS im Vergleich

Die in Tabelle 2 enthaltenen Werte sind eher etwas optimistisch. Nicht berücksichtigt sind Korrelationsverluste, Verluste bei der A/D-Wandlung und Verluste, die durch die Detailstruktur der Autokorrelationsfunktion (Nebenmaxima) bedingt sind. In der nachfolgenden Abbildung ist das charakteristische Indoor S/N-Integrationsprofil über der Zeit dargestellt.

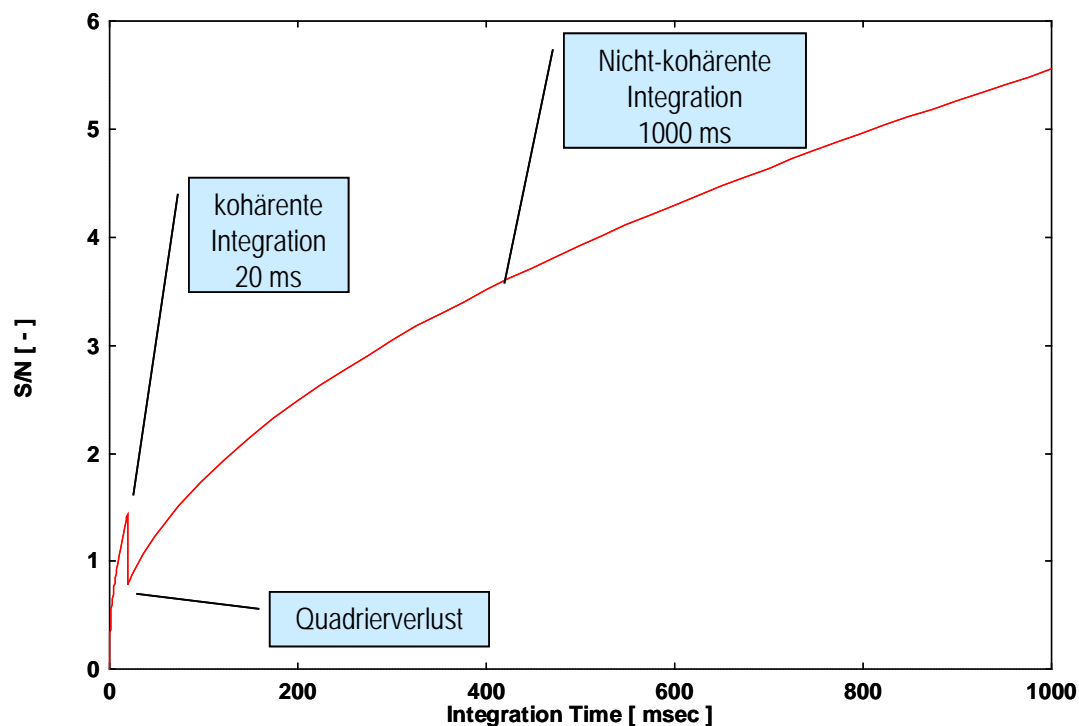


Abb. 2: Signalfluss in einem Indoor Empfänger

Einfluss des Frequenzfehlers

Ein wesentliches Problem bei der Akquisition von GPS Indoor Signalen ist die Frequenzunsicherheit unter der die Satelliten im Endgerät erscheinen bei gleichzeitig möglichst langer kohärenter Integration. Die Frequenzunsicherheit wird einmal hervorgerufen durch die gut vorhersagbare Dopplerverschiebung der einzelnen GPS Satelliten und durch den Fehler des Quarzoszillators im Endgerät, der im Normalfall unbekannt ist. Leider werden in Mobiltelefonen sehr schlechte Quarze eingesetzt, die schlechter als 10^{-6} ($> 1,5$ kHz im L – Band) im Frequenzfehler sind. Hinzu kommt die starke Schwankung des Frequenzfehlers in der Aufwärmphase des Oszillators nach Anschalten des Empfängers. Der Dopplereffekt $\Delta\omega_D = 2\pi\Delta f_D$ setzt sich aus *drei* Anteilen zusammen: Relativbewegung Satellit – Erde ± 5 kHz (1000 m/s), Unsicherheit in der Anfangsposition $\pm 0,001$ mHz/m (1000 m Fehler führt auf 1 Hz), aus der Bewegung eines Fußgängers können nochmals $\pm 5 - 20$ Hz (1 - 4 m/s)

resultieren. Der Oszillatorfehler $\Delta\omega_{\text{CXO}} = 2\pi\Delta f_{\text{CXO}}$ eines Handy kann bis zu ± 3 ppm (4,5 kHz) betragen, falls der Oszillator nicht auf das Mobilfunknetz eingerastet ist. Falls das Handy auf eine Basisstation eingerastet ist, kann der Fehler auf $\pm 0,1$ ppm (150 Hz) reduziert werden. Diese Tatsache deutet bereits die Notwendigkeit einer Assistenzfunktion aus dem Mobilfunknetz an. Man erkennt in Abb. 3, dass bei großen Frequenzunsicherheiten die Amplitude der sinc - Funktion stark abgeschwächt wird. Eine kohärente Integration über 20 ms bedingt Frequenzfehler von nur 20 Hz.

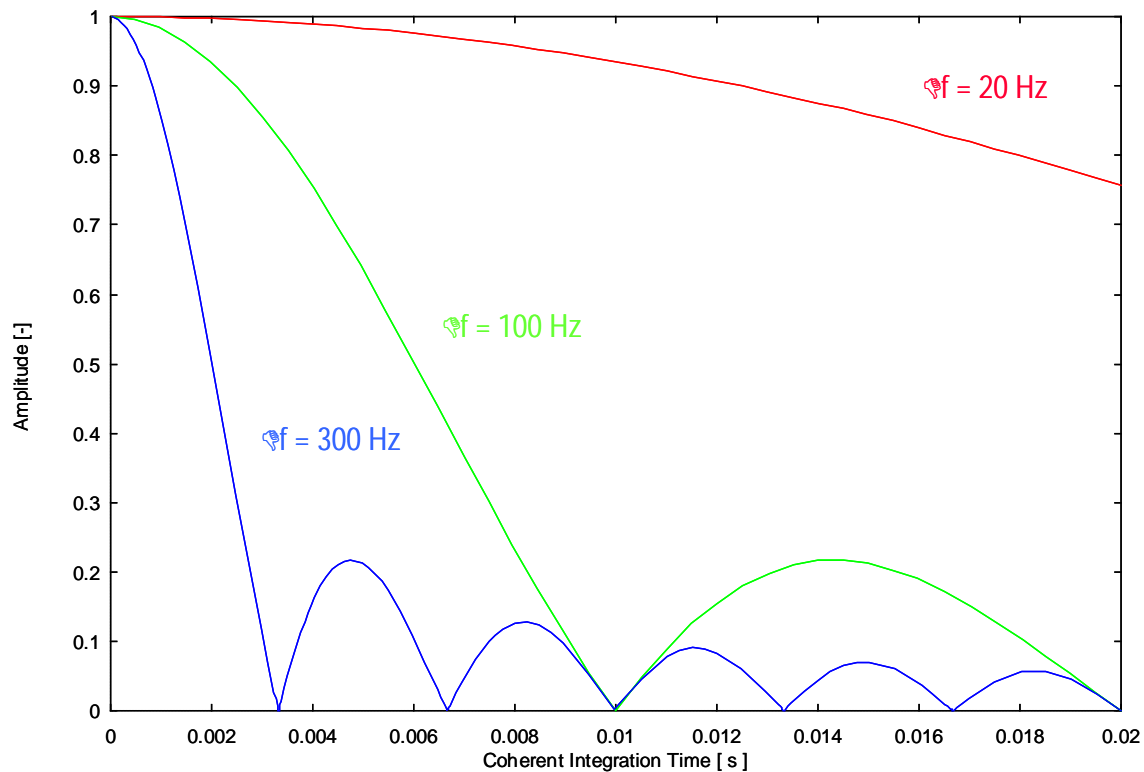


Abb. 3 : Einfluss des Frequenzfehlers bei der Akquisition auf die Signalamplitude

Quadrierverlust

Ein weiteres Problem bei der nicht-kohärenten Integration der Signale ist der so genannte Quadrierverlust. Dieser ergibt sich vom Phänomen her gesehen dadurch, dass das Signal zuzüglich Rauschen, z.B. $y = s + n$, einer nicht-linearen Operation, z.B. y^2 unterzogen wird. Als Resultat dieser Berechnung werden Signalanteile und Rauschen miteinander verknüpft, wodurch sich Mittelwert und Bandbreite des Rauschens verändern. Hierdurch wird der Signal-zu-Rauschabstand verringert. Die exakte Berechnung des Quadrierverlustes ist sehr diffizil. Deshalb wird in Abbildung 4 eine Approximation verwendet.

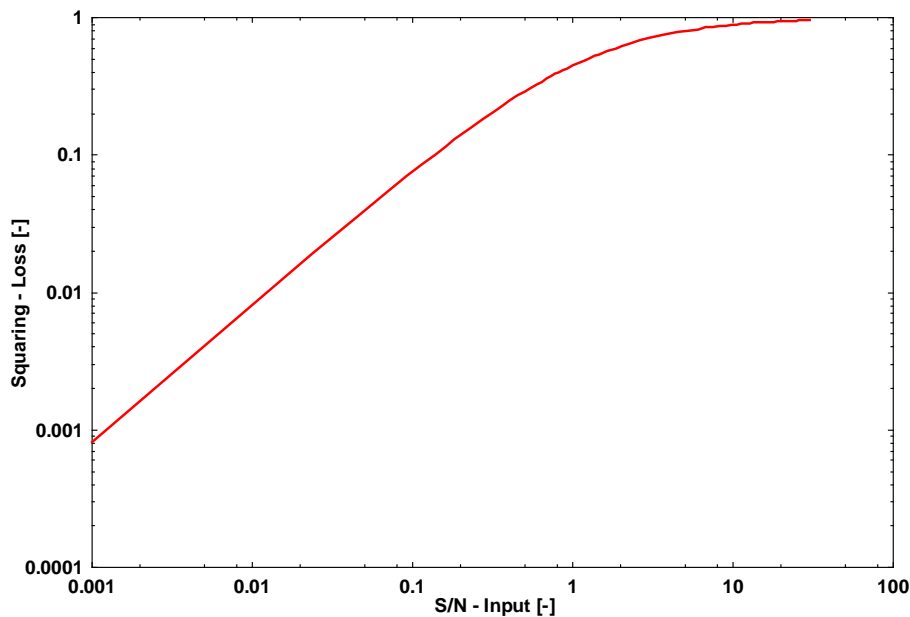


Abb. 4 : Quadrierverlust bei der nicht-kohärenten Integration

Man erkennt, dass der Quadrierverlust für kleine S/N aus der kohärenten Integration sehr groß ist. Dieser kann alles zunichte machen, was kohärent erreicht worden ist. Es ist deswegen wichtig, dass man am Ende der kohärenten Integration im $S/N > 1,0$ ist.

Indoor Akquisition

Das S/N ist prinzipiell ein statistische Größe, die um einen Mittelwert innerhalb und außerhalb eines 1σ - Bandes schwanken kann. Es muss deswegen statistisch nachgewiesen werden, dass trotz der Schwankungen noch eine sichere und richtige Entscheidung bei der Akquisition möglich ist. Dieser Nachweis wird mit Hilfe der statistischen Testtheorie geführt. Hierzu muss die Wahrscheinlichkeitsdichte für die

nicht-kohärente Größe $y = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (I_k^2 + Q_k^2)}$ einerseits für den Fall berechnet werden,

dass nur Rauschen in einer Frequenz-Zeitzele vorhanden ist, andererseits für den Fall bestimmt werden, dass ein Signal plus Rauschen in der Zelle vorhanden ist. Bei Kenntnis dieser Wahrscheinlichkeitsdichten lassen sich die Wahrscheinlichkeiten eines falschen Alarms (Signal nicht vorhanden, nur Rauschen, aber dennoch wird Akquisition für erfolgreich erklärt) und für eine erfolgreiche Detektion (Signal ist im Rauschen tatsächlich vorhanden) bestimmen. Die geschätzte Größe y wird hierfür mit einer noch zu bestimmenden Schwelle η verglichen:

1. Wahrscheinlichkeit für einen falschen Alarms

$$P_{fa} = P(y > \eta) = \int_{\eta}^{\infty} P_n(y) dy$$

2. Wahrscheinlichkeit für eine richtige Detektion

$$P_d = P(y > \eta) = \int_{\eta}^{\infty} P_{n+s}(y) dy$$

Bei den Wahrscheinlichkeitsdichten $P_n(y)$ bzw. $P_{n+s}(y)$ handelt es sich um zentrale bzw. nicht-zentrale Chi-Quadrat Verteilungen. Aufgrund der mathematischen Komplexität der Integration dieser Verteilungsdichten, wird von einer detaillierten Betrachtung abgesehen und nur das Ergebnis angegeben. Bei Vorgabe eines Wertes für P_{fa} und P_d können die obigen Integrale nach dem Schwellwert η und der Anzahl m der nicht-kohärenten Summationsschritte aufgelöst werden. Mit Abb. 5 wird die Machbarkeit der Indoor Ortung verifiziert. Auf der Horizontalachse ist das kohärente S/N abzutragen, das nach Tabelle 2 nach einer Integrationszeit von 20 ms bei 1,4 liegt. Wählt man gebräuchliche Werte für die Falschalarm- und Detektionswahrscheinlichkeit, z.B. $P_d = 0.9$ und $P_{fa} = 10^{-5}$, so erkennt man, dass hierfür etwa 50 nicht-kohärente Epochen von 20 ms Dauer erforderlich sind. Dies führt zu einer totalen Akquisitionsdauer unter Indoor Bedingungen von 1000 ms oder 1 s. Dieser Wert gibt allerdings die Verweildauer in nur einer Zelle an. Da aufgrund von Frequenz- und Zeitunsicherheiten mehrere Tausend Zellen nach einem Satelliten (Signal) zu durchsuchen sind, würden sich sehr lange Akquisitionszeiten ergeben, die für den Anwender nicht hinnehmbar sind. Deshalb muss der Rechenvorgang parallelisiert oder mit Hilfe der FFT wesentlich effizienter gemacht werden. Man sieht aus Abb. 5 ebenso, dass für den Outdoor Fall, bei dem ein kohärentes S/N von 5,2 typisch ist, eine nicht-kohärente Integration nicht mehr erforderlich ist.

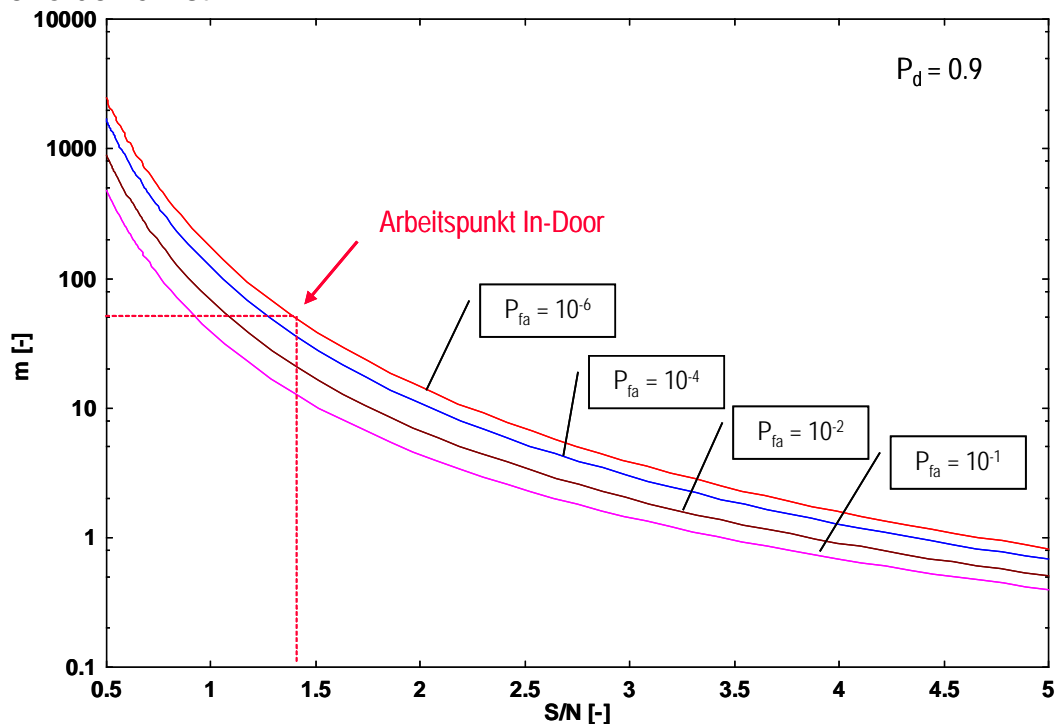


Abb. 5 : Falschalarm-Wahrscheinlichkeiten, kohärentes S/N und Anzahl der nicht-kohärenten Summanden für $P_d = 0.9$

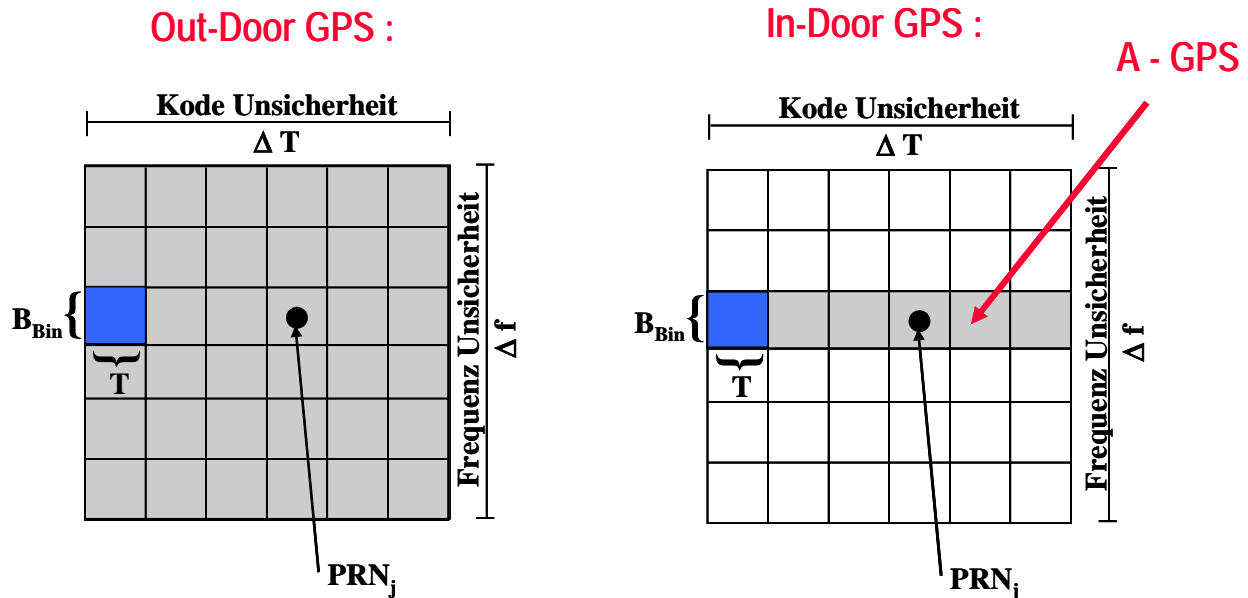


Abb. 6 : Suchproblem bei der Akquisition (Outdoor versus Indoor mit A-GPS)

Bisher wurde nur die Akquisitionsproblematik in einer einzelnen Zelle betrachtet und insbesondere die erforderliche Verweildauer abgeschätzt, um ein ausreichend großes S/N zu erzielen. Der Rechenaufwand bei der Akquisition ergibt sich dadurch, dass in Abhängigkeit von den Anfangsunsicherheiten in Zeit und Frequenz und der Frage, ob der Empfänger bereits einen GPS Almanach im Speicher hat, eine sehr große Anzahl von Zellen durchsucht und getestet werden muss.

Massiv Parallele Korrelation bei der Akquisition

Eine auf der Hand liegende Möglichkeit die Rechenzeit bei der Akquisition zu reduzieren, besteht in der Verwendung eines Rechenwerkes mit höchster Leistung für die Korrelation. Dieser Chip muss in der Lage sein, zehntausend und mehr Korrelationsberechnungen parallel auszuführen. Solche Chips wurden von Global Locate und SiRF entwickelt.

Outdoor Bedingung	Indoor Bedingung
$\Delta T = 1023$ C/A Chips	$\Delta T = 1023$ C/A Chips
$\Delta f = 10.000$ Hz (± 5 kHz)	$\Delta f = 250$ Hz (A – GPS)
Frequenzelle = 250 Hz	Frequenzelle = 250 Hz
4 Satelliten (PRN Kodes)	4 Satelliten (PRN Kodes)
Nyquist Faktor = 2	Nyquist Faktor 2
I & Q Faktor = 2	I & Q Faktor = 2
Zahl der Samples = 654720	Zahl der Samples = 16368

Tabelle 3: Größenordnung des Suchproblems Outdoor versus Indoor

Bei einem Warmstart (Almanach vorhanden) unter Outdoor Bedingungen müssen etwa 41000 Zellen getestet werden. Kann man durch eine externe Frequenzinformation (z.B. durch A-GPS) den Suchbereich auf der Frequenzachse mit einem Streifen einschränken, so ergeben sich nur noch 1023 Zellen, die nach einem Satelliten zu durchsuchen sind. Der Rechenaufwand bei der Suche ist noch

drastisch größer, da die Zahl der Zellen mit dem Samplingfaktor 16 zu multiplizieren ist (Tabelle 3). Die benötigte Akquisitionszeit errechnet sich näherungsweise nach:

$$T_{Akq} = \frac{N_s}{N_{Corr}} T_{Dwell} \quad (7)$$

T_{Akq}	...	Totale Akquisitionszeit
T_{Dwell}	...	Verweildauer in einer Zelle (dwell time)
N_s	...	Zahl der Samples
N_{Corr}	...	Zahl der parallel eingesetzten Korrelatoren

Empfänger	Outdoor Akquisition $T_{Dwell} = 0.001$ s $N_s = 654720$	Indoor Akquisition $T_{Dwell} = 1.0$ s $N_s = 16368$
<i>Standardempfänger</i> Korrelatoren: 36	$T_{Akq} = 18.2$ s	$T_{Akq} = 455$ s
<i>High-Sensitivity 1</i> Korrelatoren: 16000	$T_{Akq} = 0.04$ s	$T_{Akq} = 1.02$ s
<i>High-Sensitivity 2</i> Korrelatoren: 200000	$T_{Akq} = 0.003$ s	$T_{Akq} = 0.08$ s

Tabelle 4 : Akquisitionszeiten für typische GPS Empfänger

Die Akquisitionszeiten für den Outdoor Fall können erheblich reduziert werden, falls der Empfänger einen höherwertigen Oszillator (10^{-8}) verwendet, im Stand akquiriert und die Doppler auf den Satelliten aus dem Almanach vorausberechnet.

FFT basierte Akquisition

Eine weitere Möglichkeit, die erstmals bei SnapTrackTM angewendet wurde, besteht darin, den erforderlichen Rechenaufwand auf algorithmischer Ebene zu reduzieren, ohne dass die Leistungsfähigkeit des Rechners erheblich gesteigert werden muss. Hierfür bietet sich die Anwendung der FFT auf den Korrelationsprozess bei der kohärenten Integration an.

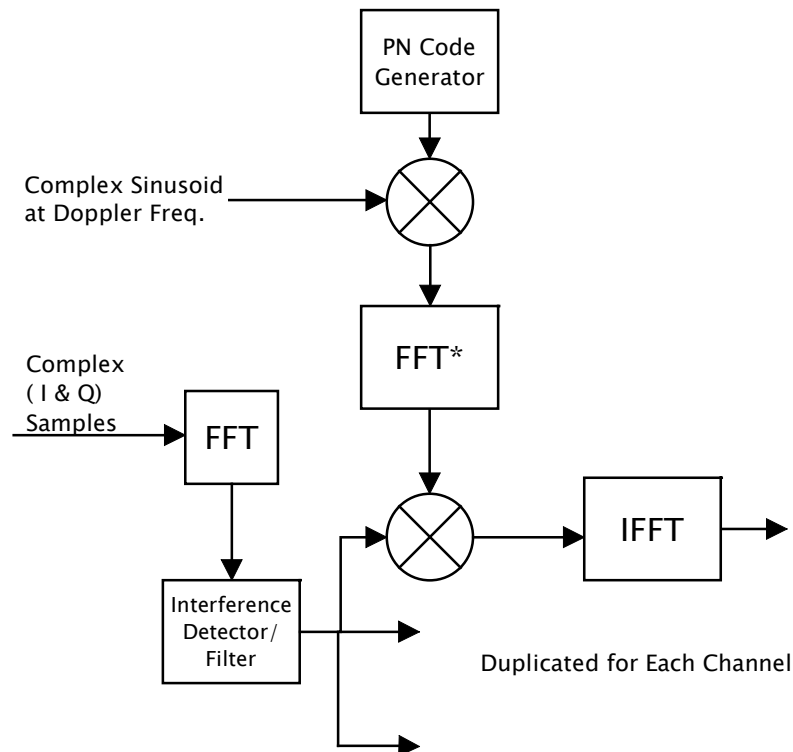


Abb. 7: Schema der FFT basierten kohärenten Integration

Bis zum A/D-Wandler im GPS Empfänger besteht bei der FFT basierten Methode kein Unterschied zum Standardansatz (Abb. 2). Die I, Q Samples werden in einer komplexen Zahl zusammengefasst und in einem Speicher über z.B. 20 ms zwischengespeichert (Data-Snap bzw. Schnappschuss). Diese Datenfolge wird nach Abb. 7 einer FFT unterzogen. Die PRN Referenzcodes werden standardmäßig erzeugt, dann allerdings ebenfalls einer konjugiert komplexen FFT* unterzogen. Interpretiert man das Korrelationsintegral im Zeitbereich als Faltung von empfangenem Code und dem Referenzcode, so geht diese Faltung im Frequenzraum über in eine einfache Multiplikation der Spektren der PRN-Kodes. Im Anschluss hieran wird das Resultat einer inversen FFT (IFFT) unterzogen, wodurch man wieder im Zeitbereich angelangt ist. Selbstverständlich muss unter Indoor Bedingungen ein nicht-kohärenter Summationsprozess nachgeschaltet werden, um ein gutes S/N zu erhalten. Der Autokorrelationsprozess im Zeitbereich benötigt n^2 Rechenoperationen. Bei Verwendung des gleichen Rechners benötigt der Autokorrelationsprozess im Frequenzraum (FFT) nur $n \log_{10} n$ Rechenoperationen. Hieraus ergibt sich theoretisch ein deutlicher Rechenzeitgewinn. In der Praxis ist ein Vergleich jedoch sehr schwierig, da Rechnerarchitektur, Schnittstellen und Implementierung einen erheblichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der FFT haben.

Assistenzfunktion

Die Indoor Ortung verwendet wie im Außenraum zunächst die beiden Elemente Navigationssatellit und Endgerät (Mobiltelefon). Zum Aufbau der Assistenzfunktion ist

ein Mobilfunknetz (Satellitenfunk wird nicht erörtert) als Basis erforderlich. Das Netz ist um ein wesentliches Element, nämlich den Location Server zu ergänzen.

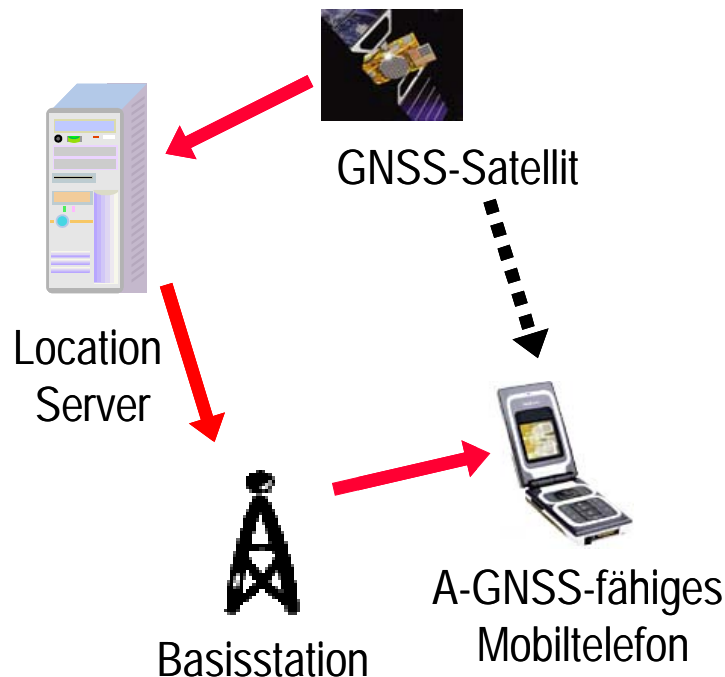


Abb. 8: Grundprinzip der Assistenzfunktion (A – GPS)

Der Location Server besitzt einen GPS-Empfänger und einen Rechner. Er empfängt und demoduliert alle GPS-Daten, synchronisiert gegebenenfalls auf GPS-Zeit und berechnet differentielle Korrekturen. Die Ausgangsdaten des Location Servers werden in den Datenstrom des Mobilfunknetzes gegeben und von den Basisstationen an das A-GPS fähige Handy gesendet. Die A-GPS Funktion stellt somit potentiell für den Indoor Anwender die folgende Information bereit:

- Almanach und Ephemeriden
- GPS-Zeit
- Frequenz- und Zeitsignal
- DGPS Korrekturen

An die beschriebene Assistenzfunktion können unterschiedliche Anforderungen gestellt werden, je nach dem wie stark man die Möglichkeiten ausschöpfen will bzw. aufgrund der Realität kann.

- Anforderung für das Durchsuchen nur eines Frequenz-Zeitstreifens (Abb. 6)
250 Hz x 1023 Chips
 - Position 10 km (10 Hz)
 - Geschwindigkeit 4 m/s (20 Hz)
 - Frequenz 0,1 ppm (150 Hz)
- Anforderung für die kohärente Integration bis zu 20 ms (Abb. 3)

- Position 1 km (1 Hz)
 - Geschwindigkeit 1 m/s (5 Hz)
 - Frequenz 0,01 ppm (15 Hz)
- Anforderung für die Einschränkung des C/A – Kode Suchbereiches
 - Zeit 0,1 ms
 - Anforderung zur Beseitigung des Navigationsdatenbits (Wipe-Off)
 - Zeit 1 ms
 - Anforderung für den GPS-Zeitbezug von GPS Daten und Korrekturen
 - Zeit 10 – 100 ms

Wipe-Off bedeutet, dass man die Signale mit einem extern bekannten Navigationsdatenbit multipliziert, um das Datenbit aus dem Signal zu beseitigen, um länger integrieren zu können. Man erkennt an diesen Zahlen, dass die Anforderung an das Assistenzsystem sehr hoch sind. So ist bei der kohärenten Integration über 20 ms bereits nur noch eine Frequenzunsicherheit von 20 Hz erlaubt. Hiernach kann die Frage gestellt werden, welche Qualität von einer Assistenzfunktion in real existierenden (unmodifizierten) Mobilfunknetzen überhaupt erwartet werden kann.

Mobilfunkstandard	Synchronisation mit GPS	Frequenzgenauigkeit	GPS Daten
GSM/GPRS	N/A	0,05 ppm	Ja
UMTS/IMT 2000	N/A	0,05 ppm	Ja
US - CDMA	50 μ s	0,05 ppm	Ja
US -TDMA	TBD	TBD	Ja

Tabelle 4 : Leistungsfähigkeit einer A – GPS Funktion in einigen Mobilfunknetzen

Man erkennt, dass weder GSM noch UMTS in Europa mit GPS synchronisiert sind. Auch die Genauigkeit der Frequenznormale in den Basisstationen mit 0,05 ppm (75 Hz im L-Band) ist für Assistenzzwecke nicht besonders hoch. Mit einem zusätzlichen Genauigkeitsabfall muss auf der Strecke von der Basisstation zum Handy gerechnet werden. Dies gilt insbesondere für GSM, wo der Frequenz- und Zeitmultiplex eine kontinuierliche Frequenzsynchronisation entgegensteht. Die Annahme einer kohärenten Integration über 20 ms oder länger ist bereits sehr optimistisch und dürfte in der Praxis kaum zu erreichen sein. Als Resümee lässt sich festhalten, dass von den realen Mobilfunknetzen in Europa zurzeit nur die Frequenzinformation für A-GPS verwendbar ist. Um das volle A-GPS Potential zu nutzen, müssen in jedem Fall die Mobilfunknetze in der Frequenz- und Zeittechnik aufgerüstet werden.

Praxistest mit einem High Sensitivity Receiver

Nachdem die theoretische Aufbereitung Wege gezeigt hat, GNSS-Signale auch in Indoor-Umgebungen empfangen zu können, soll nun der Stand der Technik anhand

einiger praktischer Tests mit einem am Markt verfügbaren Produkt aufgezeigt werden. Getestet wurde ein L1-Empfänger der Firma SiRF Technologies, die seit einiger Zeit Produkte im High Sensitivity-Segment anbietet. Das Evaluierungspaket umfasste neben dem Empfänger, der mit dem so genannten SiRFstarIIe/LP-Chip ausgestattet ist sowie einer aktiven Antenne die spezielle High Sensitivity-Software „XTrac“. Für die Akquisition schwacher Signale verwendet SiRF das Verfahren massiver Parallelkorrelation, wobei im speziellen Fall 1920 Korrelatoren implementiert sind. Im Lieferumfang ebenfalls enthalten ist eine Software SiRFDemo, die Navigationslösungen berechnet, Daten loggt und die Daten in Echtzeit visualisiert. Der Empfänger wurde über eine serielle Schnittstelle mit einem PC bzw. Laptop verbunden, auf dem SiRFDemo installiert wurde.

Die Tests wurden in verschiedenen Indoor-Umgebungen, sozusagen unter „realen“ Bedingungen durchgeführt. Dabei wurden das Signal-zu-Rauschverhältnis und die erreichte Positionsgenauigkeit untersucht.

Signal-zu-Rauschverhältnis

Für die Untersuchung des Signal-zu-Rauschverhältnisses wurden an vier verschiedenen Standpunkten Daten über eine längere Zeit (5-10 Stunden) geloggt. Ziel dieser Messungen war es, das Signal-zu-Rauschverhältnis in Abhängigkeit von Azimut und Elevation zu untersuchen. Dieser Test sollte Erkenntnisse darüber bringen, in welchen Umgebungen noch an einen sinnvollen Einsatz des SiRFstarII-Receiver zu denken ist. Es ist zu beachten, dass es sich bei den vom Empfänger ausgegebenen und den hier wiedergegebenen Signal-zu-Rauschverhältnissen immer um das C/N_0 handelt. Dies ist nicht mit dem S/N aus den vorigen Kapiteln zu verwechseln. Das C/N_0 bezeichnet die Stärke des Trägersignals im Verhältnis zum Rauschsignal normiert auf eine Zwischenfrequenzbandbreite von 1 Hz. Der mathematischen Zusammenhang zwischen C/N_0 und S/N_{ZF} ist in Formel (3) einzusehen.

Abb. 10 veranschaulicht die vier Testumgebungen. Bei der Umgebung 1 handelt es sich um ein von der Wand- und Deckentiefe wenig massives Gebäude, in dem jedoch Stahlträger und als Verkleidung viel Holz, Glas und Blech verwendet wurden. Im Deckenbereich befinden sich zwei Dachfenster. Bei den Umgebungen 2-4 handelt es sich um einen massiven Betonbau mit einem eher leichten Dachaufbau. Umgebung 2 befindet sich im Obergeschoss dieses Gebäudes, Umgebung 3 im Erdgeschoss und Umgebung 4 im äußeren Kellereingang. A priori können die Umgebungen 1 und 2 aufgrund der Baumaterialien als eher unschwierig und die Umgebungen 3 und 4 als problematisch für den Signalempfang angesehen werden.

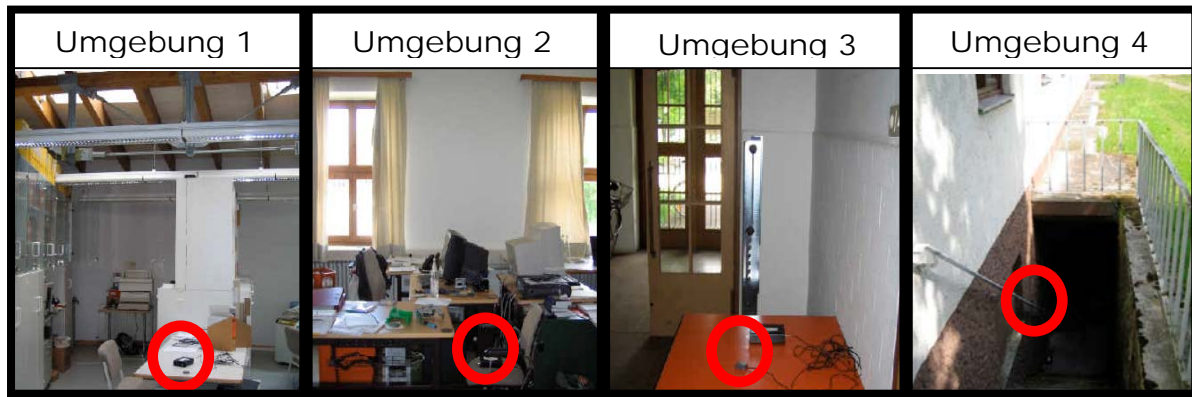


Abb. 10: Reale Indoor-Testumgebungen

Abb. 11 stellt die tatsächlich erreichten Signal-zu-Rauschverhältnisse in Abhängigkeit von Azimut und Elevation dar. Für die azimut- und elevationsabhängige Darstellung wurden Azimutbereiche zu je 20 Grad und Elevationsbereiche zu je fünf Grad zusammengefasst, so dass insgesamt $18 \times 18 = 324$ Felder entstanden. Zur besseren Verdeutlichung sind wichtige Strukturen der Indoor-Umgebung mit schwarzen Umrissen nachgezeichnet. Mit zunehmendem Signal-zu-Rauschverhältnis sind die Felder von türkis über grün, gelb, orange, rot bis rotbraun eingefärbt. Flächen mit tiefblauer Farbe weisen darauf hin, dass aus diesen Bereichen keine Satellitendaten vorliegen. Dies kann an einer zu großen Signaldämpfung der Umgebung liegen. Im Regelfall jedoch handelt es sich hier lediglich um Bereiche, die während der fünft- bis zehnstündigen Messdauer nicht durch einen Satellitenorbit abgedeckt wurden.

In der Umgebung 1 ist deutlich zu erkennen, dass die Dachkonstruktion für die Satellitensignale durchlässiger ist als die Seitenwand. Zwei relative „hot spots“ auf der Deckenfläche markieren zwei Luken aus Glas. Auch in der Umgebung 2 ist ein signifikanter Unterschied zwischen Elevationen bis ca. 45° bzw. darüber festzustellen. Allerdings bildet hier im wandseitigen Bereich eine Fensterfront im Bereich von ca. 50° bis 140° Azimut eine Ausnahme. Hier wurden deutlich höhere Signal-zu-Rauschverhältnisse registriert. Die Dachkonstruktion lässt durchweg hohe Empfangssignalstärken zu, da im Obergeschoss keine Betondecke vorhanden ist.

Umgebung 3 veranschaulicht Messungen im selben Gebäude wie Umgebung 2, allerdings einen Stockwerk tiefer. Durch die vorhandene Betondecke sind die Signal-zu-Rauschverhältnisse bei hohen Elevationen signifikant geringer. Die Antenne wurde jedoch in relativer Nähe zur Ausgangstür platziert. Deutlich ist dies bei Azimut 300° sichtbar. Hier finden sich hohe Signal-zu-Rauschverhältnisse bei geringer Elevation. Dass darüber hinaus diese bei geringen Elevationen höher sind als bei den übrigen Testumgebungen, ist jedoch nicht plausibel zu erklären. Umgebung 4 befand sich unmittelbar an einer Hauswand etwa einen Meter unterhalb des Erdbodenniveaus in einem Kellereingang. Zwischen 200° und 20° Azimut befand sich das komplette Gebäude in der Sichtlinie. Empfangene Signale haben entweder das komplette Gebäude passiert oder wurden als indirektes Signal durch ein direkt gegenüber liegendes hohes Gebäude, das als Reflektor fungierte, hineingespiegelt. Bei höheren Elevationen im Azimutbereich zwischen 20° und 200° waren nur geringe Abschattungen durch eine Überdachung sowie diverse Vegetation vorhanden, so dass hier die höchsten Empfangsstärken gemessen wurden.

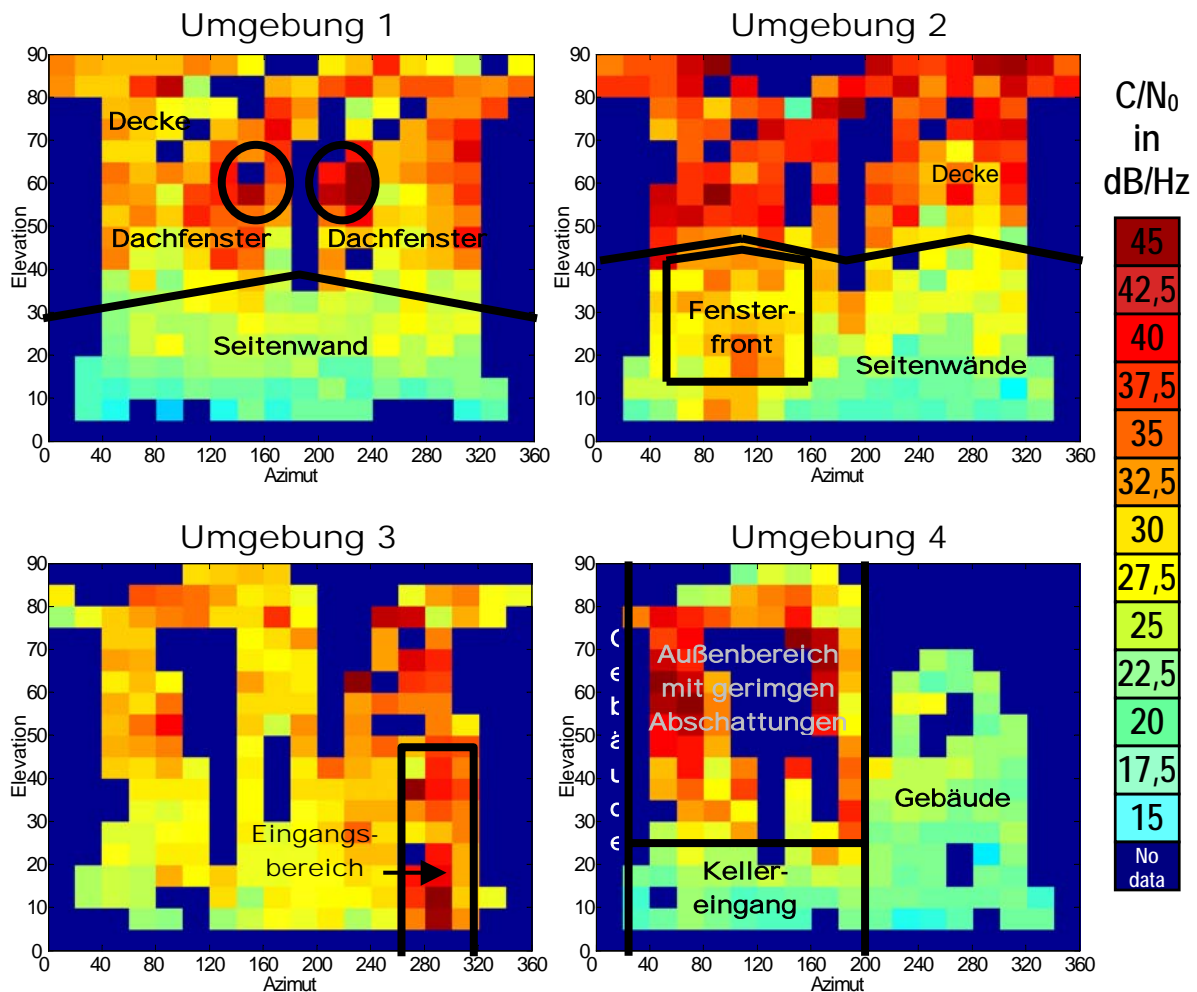


Abb. 11: Signal-zu-Rausch-Verhältnisse der vier untersuchten Umgebungen in Abhängigkeit von Azimut und Elevation

Sämtlichen Tests zur Ermittlung der Signal-zu-Rauschverhältnisse ging ein Warmstart des Empfängers sowie eine Einlaufphase von wenigen Minuten im Outdoor- oder Übergangsbereich voraus. Ohne diese anfängliche Hilfestellung wäre die Akquisition der Signale besonders in den Umgebungen 3 und 4 nicht gelungen. Für die erfolgreiche Akquisition nach einem Warmstart hat sich bei weiteren Tests ein Signal-zu-Rauschverhältnis von mindestens 24 dB/Hz als notwendig erwiesen. Dies entspricht in etwa einer Signaldämpfung von 25 dB (Faktor 300) gegenüber der Outdoor-Leistung. Das fortlaufende Signal-Tracking gelang dagegen zum Teil noch bei Signal-zu-Rauschverhältnissen von 15 dB/Hz, wie auch Abb. 11 belegt. Der Nutzer wird jedoch vor der Verwendung solch schwacher und wahrscheinlich fehlerbehafteter Signale für die Navigation insofern geschützt, als dass von der Software nur Navigationslösungen unter Benutzung von Satelliten mit einem Mindest-Signal-zu-Rauschverhältnis von 20 dB/Hz erzeugt werden.

Positionierungsgenauigkeiten

Die Messungen der gleichen vier Punkte wurden außerdem herangezogen, um die erzielbare Genauigkeit zu untersuchen. Bei den Angaben in Tab. 5 handelt es sich um Standardabweichungen um den Mittelwert, also eine Wiederholungsgenauigkeit, da

keine Referenzkoordinaten für die Messpunkte vorlagen. Es wurden die Koordinatenkomponenten geographische Länge, Breite und Höhe sowie die 3D-Positionsgenauigkeit betrachtet. Es handelt sich ausschließlich um Standalone-Lösungen, da eine DGPS-Option bei der aktuellen Generation der XTrac-Software noch nicht verfügbar ist.

Messpunkt	3D [m]	Breite [m]	Länge [m]	Höhe [m]
Umgebung 1	27,85	14,53	7,00	22,71
Umgebung 2	17,31	7,81	6,01	14,24
Umgebung 3	31,01	13,03	9,25	26,58
Umgebung 4	22,73	10,70	11,97	16,09

Tab. 5: Standardabweichungen der Navigationslösungen in den Umgebungen 2 bis 4

Umgebung 2 erweist sich als die Messumgebung mit der besten Genauigkeit. Dies korreliert gut mit den im Schnitt höchsten Signal-zu-Rauschverhältnis aus Abb. 11. Umgebung 1 schneidet relativ schlecht ab. Vor allem die schwachen Signale aus geringen Elevationen scheinen der Höhenkomponente zu schaden. In Umgebung 4 wiederum tritt der für GPS ungewöhnliche Fall auf, dass die Längenkomponente schlechter ist als die der Breite. Dies lässt sich damit erklären, dass in diesem Fall fast die gesamte westliche Hemisphäre durch das Gebäude abgeschattet war. Ergänzend ist festzustellen, dass in Umgebung 3 in insgesamt 20% der Messepochen weniger als 4 Satelliten zur Verfügung standen, also gar keine 3D-Navigationslösung erzeugt wurde. In Umgebung 4 betrug dieser Anteil rund 18%. 0,3 % aller Navigationslösungen in Umgebung 3 blieben in der Auswertung von vornherein als grob falsche Lösungen unberücksichtigt. In den anderen Umgebungen kam es zu keinen groben Fehlern.

Zusammenfassung der Testergebnisse

Es konnte gezeigt werden, dass der GPS-Signalempfang in geschlossenen Räumen bereits mit aktueller Empfängertechnologie möglich ist. Allerdings gelingt eine Akquisition der Signale durch Betonwände mit Signaldämpfungen von 25 dB und mehr nicht mehr. Die erreichten Genauigkeiten sind angesichts der Tatsache, was mit Low-Cost-Empfängern im Outdoor-Bereich inzwischen erreicht werden kann, auf dem ersten Blick eher mäßig. Geht man von einem normalen Bürogebäude aus, ist man von raumgenauer Navigation noch sehr weit entfernt. Um diesen hohen Anforderungen gerecht zu werden, ist jedoch selbst bei großen Fortschritten in der Indoor-Empfängertechnologie der Einsatz differentieller GPS-Verfahren unvermeidbar.

Referenzen

European Commission, Survey on Implementation of Emergency Call 112, Brüssel, Jan. 1999

Federal Communications Commission, Enhanced E-911, www.fcc.gov/911/, Washington (DC)

Taylor, R., Sennot. J, US Patent 4445118, 1981

Brown, A., Stzrza., M., US Patent 5225842, 1991

Michler, B., Strey, M., Untersuchungen zur DAB-Inhouse-Versorgung im L-Band, 43rd International Scientific Colloquium, Technical University of Ilmenau, September 1998

Peterson, B., Bruckner, D., Heye, Sh., Measuring GPS Signals Indoors, Proc. Of ION-GPS 1997, Part I, pp.615, Kansas City, Missouri

Moeglein, M., Krasner, N., An Introduction to SnapTrack™ Server-Aided GPS Technology, Proc. Of ION-GPS 1998, Part I, pp.333, Nashville, Tennessee.

Stone, W. C., Electromagnetic Signal Attenuation in Construction Materials, NIST Report 6055, National Institute of Standards, 1997, Gaithersburg, Maryland

Krasner, N.F., Marshall, G., Riley, W., Position Determination Using Hybrid GPS/Cellphone Ranging, Proc. of ION-GPS 2002, pp. 165, Portland, Oregon.

Van Diggelen, F., Global Locate Indoor GPS Chipset & Services, Proc. Of the ION-GPS 2001, Salt Lake City, Utah.

Van Diggelen, F., Abraham, Ch., Indoor GPS Technology, CTIA Wireless-Agenda, Dallas, May, 2001.