

# Anforderungen an Empfänger eines TDOA-basierten Ortungssystems



# Inhalt

Funkerfassungsempfänger müssen bestimmte Anforderungen für den Einsatz in einem TDOA-basierten Ortungssystem erfüllen. Die Applikationsbroschüre beschreibt diese Anforderungen und weitere wichtige Parameter zur Auswahl der Sensoren.

## Produkte von Rohde&Schwarz

- R&S®ESMD Breitband-Funkerfassungsempfänger
- R&S®EB500 Funkerfassungsempfänger
- R&S®EM100 digitaler Kompaktempfänger
- R&S®UMS Monitoring- und Peilsystem

<b>Einführung</b> .....	3
<b>Sensorik von Rohde&amp;Schwarz für TDOA-Netzwerke</b> .....	4
<b>Zeitstempel in I/Q-Daten</b> .....	5
Grundlagen .....	5
Referenzieren des Zeitstempels auf den Antenneneingang des Empfängers .....	5
Genauigkeit der internen Empfängeruhr .....	6
Bedeutung eines absoluten Zeitstempels .....	6
<b>Wichtige Parameter eines TDOA-Sensors</b> .....	7
Frequenzgenauigkeit .....	7
Rauschen und Linearität.....	8
GPS.....	9
Zeitstempelgenauigkeit .....	10
<b>Zusammenfassung</b> .....	11

# Einführung

Die Emitter-Lokalisierung mittels gemessener Laufzeitdifferenzen (Time Difference of Arrival, TDOA) an verschiedenen Empfängerstandorten existiert bereits seit Jahrzehnten. In der Vergangenheit bestand die größte Herausforderung darin, Zeitgleichheit an verschiedenen, abgesetzten Empfängerstandorten herzustellen. Zur exakten Synchronisierung mehrerer Empfänger standen dafür äußerst komplizierte Methoden zur Verfügung. Ohne eine geeignete Synchronisierung sind allerdings die Ergebnisse eines solchen Ortungsverfahrens unbrauchbar, da sich bereits durch geringe Zeitfehler große Abweichungen bei der Ortung ergeben. So führt beispielsweise ein Fehler von 100 ns bei der Zeitmessung mit einem Sensor zu einem Fehler von 30 m in der Entfernungsabschätzung. Werden mehrere Sensoren miteinander kombiniert, addieren sich die Fehler und führen zu einem unbrauchbaren Ortungsergebnis.

Zum Erreichen der Zeitgleichheit an unterschiedlichen Empfängerstandorten werden heute fast ausschließlich GPS-Signale verwendet. Damit wird die Genauigkeit erzielt, die zur Nutzung der entstehenden Laufzeitdifferenzen für die Bestimmung des Signalursprungs notwendig ist.

Für die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ortung ist das Aufprägen der Zeitinformation aus der hochgenauen, internen Uhr auf den digitalen Basisbanddatenstrom (I/Q-Daten) entscheidend.

Weitere Empfängerparameter oder -eigenschaften für die Verwendung als TDOA-Sensor werden nachfolgend ausführlich beschrieben.

# Sensorik von Rohde & Schwarz für TDOA-Netzwerke

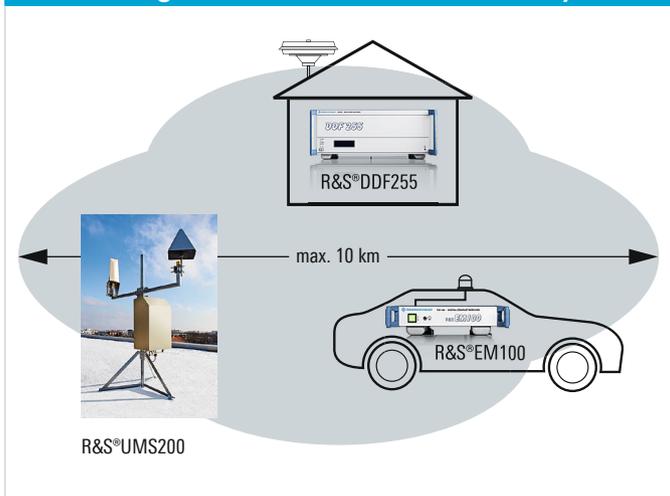
Die Funkefassungsempfänger von Rohde & Schwarz bilden das Kernstück für die Sensorik eines TDOA-Netzwerkes. Alle Funkefassungsempfänger und Peiler liefern über LAN einheitliche I/Q-Daten mit einem darin enthaltenen Zeitstempel. Diese Daten werden immer mit der Uhrzeit der internen Empfängeruhr unter Berücksichtigung der internen Laufzeiten markiert – unabhängig von der Genauigkeit der internen Uhr. Der Einsatz eines Empfängers als Sensor in einem TDOA-Netzwerk hängt also von den Synchronisierungsmöglichkeiten der internen Uhr ab. Alle Funkefassungsempfänger sind über ein externes GPS-Modul synchronisierbar. Die Genauigkeiten der Zeitkompensationen und der Zeitstempel sowie die Synchronisierungsmöglichkeiten mit einem internen GPS-Modul sind den Broschüren der Funkefassungsempfänger zu entnehmen (siehe Tabelle).

Der Vorteil besteht in der Flexibilität bei der Auswahl der Sensorik: Das einheitliche Datenformat und die in allen Empfängern verwendete Zeitkompensation ermöglichen die individuelle Kombination der Sensoren in einem TDOA-Netzwerk. In Abhängigkeit von den Standortanforderungen kann immer der jeweils passende Funkefassungsempfänger gewählt werden. Sind an dem Standort neben I/Q-Datenaufzeichnungen zur TDOA-Lokalisierung ITU-konforme Messaufgaben zu erfüllen, kann der R&S®ESMD Breitband-Funkefassungsempfänger oder der R&S®EB500 Funkefassungsempfänger verwendet werden. Beide können zum Beispiel mit Sensoren auf Basis des R&S®EM100 digitalen Kompaktempfängers in einem TDOA-System verknüpft werden. Der R&S®EM100 wird an Standorten eingesetzt, an denen zusätzlich einfache Monitoring- oder Messaufgaben durchgeführt werden.

Neben technischen Kriterien ist der praktische Installationsaufwand wichtig. Funkefassungsempfänger von Rohde & Schwarz werden in Standardgehäusen zum Rack-Einbau verbaut (Ausnahme: R&S®PR100). Damit sind sie für den fahrzeuggestützten Einsatz oder zur stationären Verwendung in einer Funküberwachungsstation geeignet. Für die Mastmontage im Freien ist ein externes Gehäuse erforderlich. Die Funkefassungsempfänger werden dann in ein R&S®UMS Monitoring- und Peilsystem eingebaut. Je nach Konfiguration enthält dieses neben den Empfängern zusätzliche Ausstattung für den abgesetzten Betrieb in einem wetterfesten Gehäuse (z.B. einen PC, eine Temperaturregelung für einen erweiterten Temperaturbereich). Die Verwendbarkeit für TDOA-Zwecke und die unterschiedlichen Konfigurationen sind in den Broschüren der R&S®UMS-Systeme beschrieben (z.B. PD 5214.3575.11).

Funkefassungsempfänger von Rohde & Schwarz sind zu Einkanal-Peilern erweiterbar oder direkt als Einkanal-Peiler erhältlich (Ausnahme: R&S®EB510). Je nach Frequenzbereich werden mit den passenden Peilantennen die Peilergebnisse nach dem Watson-Watt-Prinzip oder mittels korrelativem Interferometer berechnet. Die Verwendungsmöglichkeiten des Funkefassungsempfängers in einem TDOA-Netzwerk bleiben gleich. Neben der Kombination des TDOA-Prinzips mit herkömmlichen (Angle of Arrival, AoA) Peilverfahren vereint Rohde & Schwarz die Funktionalität beider Verfahren in einem Gerät. So sind die Vorteile beider Verfahren in einem hybriden Ortungssystem für ein möglichst genaues Ortungsergebnis nutzbar. Die Herausforderung besteht in der Datenverarbeitung des Systems: Es muss in der Lage sein, die Ergebnisdaten beider Verfahren zu verarbeiten.

## Verwendung mehrerer Produkte in einem System



## Zur Verwendung in einem TDOA-Netzwerk geeignete Empfänger

Empfänger	Synchronisierung mit GPS-Modul		Broschüre Sachnummer
	Intern	Extern	
R&S®ESMD	•	•	PD 5213.9863.11
R&S®EB500		•	PD 5214.3800.11
R&S®EM100		•	PD 5214.0560.11

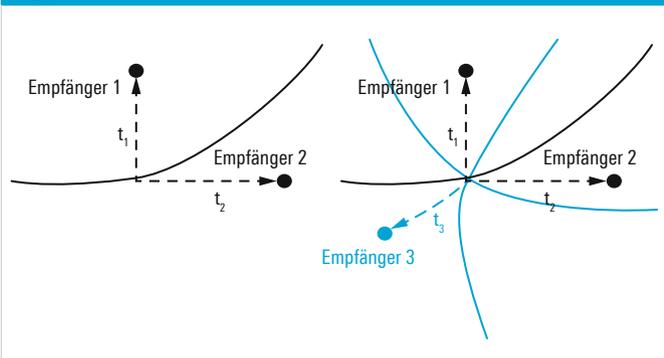
# Zeitstempel in I/Q-Daten

## Grundlagen

Für die Berechnung eines eindeutigen Ortungsergebnisses werden in einem TDOA-basierten Ortungssystem mindestens drei Empfänger benötigt. Mittels Kreuzkorrelation der an verschiedenen Empfängerstandorten empfangenen Signale kann die relative Laufzeitdifferenz der Signale zwischen zwei Standorten bestimmt werden. Der relative Zeitunterschied ergibt auf der Karte eine Hyperbel. Auf dieser sollte sich der Emittor im Idealfall befinden. Aus der Kombination mit dem dritten Empfänger ergeben sich zwei weitere Hyperbeln. Im Idealfall schneiden sich diese drei Hyperbeln genau in einem Punkt; dieser Schnittpunkt ist der Ursprungsort des Signals.

Zur Berechnung einer Hyperbel werden die I/Q-Daten zweier Empfänger miteinander korreliert. Um von der Kreuzkorrelation der I/Q-Daten auf einen relativen Zeitunterschied schließen zu können, müssen die I/Q-Daten mit hochgenauen Zeitinformationen versehen sein. Hierin besteht die größte Herausforderung: Unterschiedliche Empfängereinstellungen bedingen unterschiedliche Signallaufzeiten innerhalb des Geräts. So beeinflusst beispielsweise die Wahl der Mittenfrequenz den Signalweg oder die Filtercharakteristik in der Vorselektion, oder eine Bandbreitenumstellung verändert die Abtastrate. Um I/Q-Daten mit genauen und absolut (in Bezug auf die koordinierte Weltzeit, UTC) richtigen Zeitinformationen zu versehen, müssen die Laufzeiten für sämtliche Einstellungen im Empfänger bekannt sein und beim Aufprägen des Zeitstempels in die I/Q-Daten berücksichtigt werden.

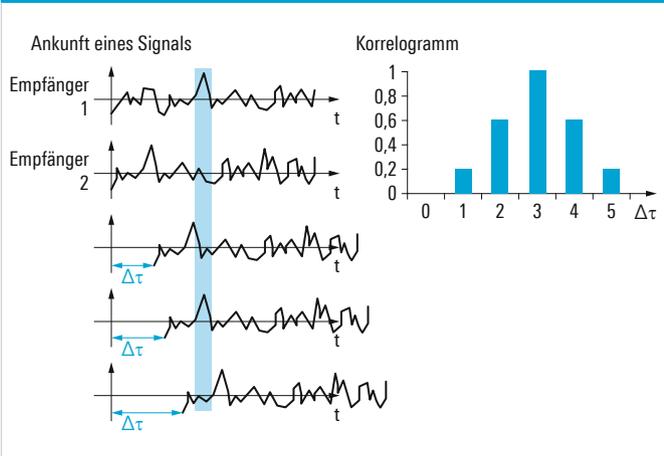
## Lokalisierung des Emitters im Schnittpunkt dreier Hyperbeln



## Referenzieren des Zeitstempels auf den Antenneneingang des Empfängers

Maximale Unabhängigkeit und Flexibilität in einem TDOA-System wird erreicht, wenn die in den I/Q-Daten enthaltene Zeitinformation den Zeitpunkt beschreibt, an dem sich ein Signal am Antenneneingang des Empfängers befindet. Dazu müssen die exakten Signallaufzeiten aller im Empfänger möglichen Einstellungen bekannt sein. Da der Zeitstempel den I/Q-Daten erst im Digitalteil des Empfängers mitgegeben werden kann, ist die Laufzeit bis zum eigentlichen Aufprägen des Stempels rückwirkend zu berücksichtigen. Ohne Zeitkompensation beziehungsweise Referenzieren des Zeitstempels auf den Antenneneingang ist die Kombination unterschiedlicher Empfänger in einem TDOA-Netzwerk unmöglich, da in unterschiedlichen Empfängertypen verschiedene Zeitfehler entstehen.

## Bestimmung der Laufzeitdifferenz aus I/Q-Daten

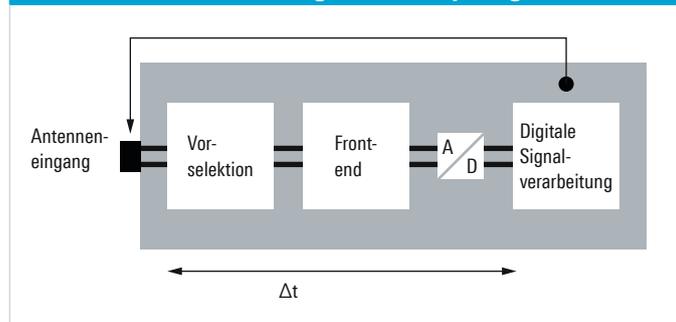


Je komplizierter die Empfänger-Hardware ist (mehr Kombinationen unterschiedlicher Signalpfade möglich), desto aufwändiger gestaltet sich die Implementierung dieser Zeitkompensation. Der Empfänger enthält eine Korrekturtabelle mit den Laufzeiten aller möglichen Geräteeinstellungen. Dazu gehören Einflüsse der analogen Hardware und im Digitalteil entstehende Verzögerungen. Diese Korrekturtabelle erleichtert die Arbeit von Systemintegratoren,

da nur noch externe Verzögerungen ab dem Antenneneingang des Empfängers zu berücksichtigen sind (z.B. Kabel-längen zur Antenne). Zur Erstellung der Korrekturtabelle werden die Signallaufzeiten aller möglichen Einstellungen berechnet. Der Effekt einer Korrekturtabelle wird bei der Kombination mehrerer Empfänger im System deutlich: Aus Kostengründen besteht ein TDOA-System idealerweise aus identischen und möglichst kosteneffizienten Empfängern, da mehr Sensoren als bei einem herkömmlichen Peilernetzwerk erforderlich sind. Im stark bebauten städtischen Umfeld empfiehlt sich eine Mischkonfiguration aus kompakten und höherwertigen Empfängern mit guten HF-Eigenschaften. Die dort gehäuft auftretenden Signale werden von Empfängern mit guten HF-Eigenschaften besser empfangen.

Ein Anwender sollte also in Abhängigkeit vom Standort unterschiedliche Empfänger auswählen können, um zum Beispiel in der Nähe starker Sender gute Empfangsbedingungen herstellen zu können.

### Vereinfachte Darstellung eines Empfängers



### Hinweis

Bei Verwendung identischer Sensoren in einem TDOA-Netzwerk ist eine Zeitkompensation in den verwendeten Empfängern sinnvoll, sonst müssen alle bei einer Messung verwendeten Sensoren exakt die gleichen Einstellungen haben. Die unterschiedlichen internen Laufzeiten würden sonst – bei unterschiedlichen Empfängereinstellungen – einen zu großen Zeitfehler verursachen.

Ein TDOA-Netzwerk benötigt viele, sorgfältig ausgewählte Standorte zur Platzierung der Sensorik. Stehen verschiedene Sensoren mit eingebauter Zeitkompensation zur Verfügung, können verschiedene Standorte für zusätzliche Messaufgaben verwendet werden. Das spart erheblich Kosten, wenn beispielsweise ITU-konforme Funkerfassungsempfänger für Ortungsaufgaben in einem TDOA-Netzwerk verwendet werden. Besteht die Möglichkeit, Empfänger an bereits implementierten Messstandorten um die GPS-Zeitsynchronisierung zu erweitern, verringert sich der zusätzliche Hardwareaufwand.

### Genauigkeit der internen Empfängeruhr

Die Genauigkeit des internen Quarzoszillators eines Funkerfassungsempfängers liegt – ohne externe Synchronisierung – typischerweise bei 0,1 ppm bis 1 ppm. Selbst wenn die interne Uhr nach der genauen GPS-Zeit gestellt wird, würde sie aufgrund der Ungenauigkeit der Referenzfrequenz sehr schnell wieder zu ungenau für ein TDOA-System sein. Ein wiederholtes Nachregeln der Uhrzeit ist nicht sinnvoll, da es zum Beispiel bei einer Mehrfachnennung von Uhrzeiten zu Mehrdeutigkeiten im Datenstrom kommen könnte. Somit muss neben der Synchronisierung der internen Uhr die Stabilität beziehungsweise die Genauigkeit der internen Referenzfrequenz erhöht werden. GPS-Empfänger können zusätzlich zur Orts- und Zeitinformation einen Sekundenpuls (Pulse per second, PPS) liefern. Dieser Puls ist jedoch bei vielen GPS-Modulen mit starken Schwankungen (Jitter) behaftet, was sie für TDOA-Zwecke disqualifiziert. Bei hochwertigen GPS-Empfängern hingegen liegt die absolute Genauigkeit im zweistelligen Nanosekundenbereich. Der Sekundenpuls wird zum Stabilisieren der internen Referenzfrequenz des Funkerfassungsempfängers verwendet; diese erzielt dann im Idealfall Genauigkeiten im Pikosekundenbereich. Mit dieser zusätzlichen Regelung wird die Empfängeruhr nur einmal nach der GPS-Zeit gestellt und anschließend mit der genauen Referenzfrequenz nachgeregelt.

### Bedeutung eines absoluten Zeitstempels

Das Referenzieren des Zeitstempels auf den Antenneneingang und das Erhöhen der Genauigkeit der internen Uhr sind Grundvoraussetzungen, um den I/Q-Datenstrom mit einem absoluten, auf UTC bezogenen Zeitstempel zu versehen. Ohne diese Laufzeitkompensation im Empfänger ist der Zeitpunkt, auf den sich der Zeitstempel bezieht, undefiniert.

Der I/Q-Datenstrom aus dem Empfänger besteht aus einzelnen Paketen mit Header und den eigentlichen I/Q-Samples. Der Header enthält neben dem absoluten Zeitstempel die aktuelle Abtastrate, mit der die I/Q-Daten im Gerät erzeugt werden. Damit ist für jedes einzelne Sample-Paar der genaue Zeitpunkt der Ankunft am Antenneneingang des Empfängers verknüpft. Diese Zeitinformation wird dem I/Q-Datenstrom der Funkerfassungsempfänger von Rohde&Schwarz immer mitgegeben, wodurch die Geräte nicht an einen bestimmten TDOA-Modus gebunden sind.

Aufzeichnungen aus dem I/Q-Datenstrom sind auch nachträglich für eine TDOA-Ortung verwendbar. Diese Offline-TDOA ist zum Beispiel sinnvoll, wenn zu den Standorten der Sensoren keine ausreichende Datenverbindung hergestellt werden kann. Voraussetzung sind das Vorliegen von Aufzeichnungen von drei verschiedenen Standorten von derselben Frequenz zur gleichen Zeit und der Empfang desselben Signals an allen Standorten.

# Wichtige Parameter eines TDOA-Sensors

Bei der Auswahl der Sensorik für ein TDOA-System sind einige Parameter bezüglich der Ortungsgenauigkeit des Systems zu beachten. Diese Parameter und deren Zusammenhang werden am Beispiel des R&S®ESMD Breitband-Funkerkfassungsempfängers erläutert.

## Frequenzgenauigkeit

Die Frequenzgenauigkeit als Maß für die Genauigkeit der internen Referenzfrequenz beeinflusst die Genauigkeit der internen Uhr, da die interne Empfängeruhr von der internen Referenzfrequenz abgeleitet wird. Die Genauigkeit des internen Standard-Quarzoszillators ist ohne externe Referenz und interne Regelung für TDOA-Zwecke unzureichend. Daher ist die Angabe der Frequenzgenauigkeit ohne externe Regelung bei der Sensorauswahl für ein TDOA-Netzwerk unbrauchbar. Entscheidend ist die Genauigkeit der internen Referenzfrequenz bei zusätzlicher externer Regelung, zum Beispiel durch ein GPS-Signal. Besonders wichtig sind hierbei die Kurzzeitstabilität und die über längere Zeit gemittelte Frequenzgenauigkeit (z.B. 24 h).

## Kurzzeitstabilität

Die Kurzzeitstabilität beeinflusst die Bestimmung von Ortungsergebnissen eines TDOA-Systems: Je genauer der Wert ist, desto weniger weichen aufeinanderfolgende Ergebnisse der Kreuzkorrelation voneinander ab. Die Hyperbeln auf der Karte spiegeln dieses Verhalten im gleichen Maß wider. Die Stabilität des Ortungsergebnisses hängt damit direkt von der Kurzzeitstabilität der internen Referenzfrequenz ab.

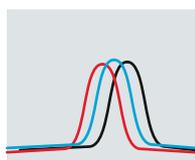
Da es sich bei diesem Parameter um einen normalverteilten Wert handelt, wird er durch statistische Größen angegeben. Für einen definierten Betrachtungszeitraum  $\tau$  ergibt sich eine Standardabweichung  $\sigma$ , in der sich statistisch gesehen 68,3 % aller Messwerte befinden. Der Mittelwert ist in diesem Fall Null (keine Abweichung).

Wird die Betrachtungszeit  $\tau$  verlängert, verringert sich die Standardabweichung  $\sigma$ . Um die Fluktuation aufeinanderfolgender Ergebnisse einzuschätzen, werden kurze Betrachtungszeiten verwendet (wenige Sekunden). Beim R&S®ESMD beträgt die Kurzzeitstabilität:  $\tau = 2 \text{ s}$ ;  $\sigma = 2 \times 10^{-10} \text{ }^{1)}$ .

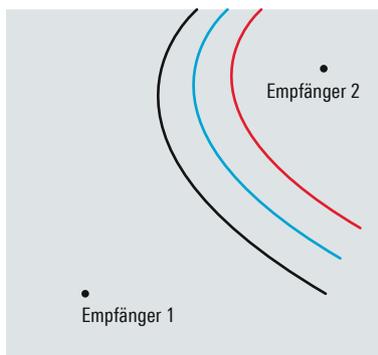
Eine schlechte Kurzzeitstabilität der internen Referenzfrequenz erhöht die Streuung der zur Ortung verwendeten Hyperbeln auf der Karte. Bei der Kombination der Hyperbeln unterschiedlicher Empfänger zu einer Ortung addieren sich diese Streuungen und verschlechtern das Ortungsergebnis.

<sup>1)</sup> Siehe technische Daten: PD 5213.9863.21.

## Auswirkung schlechter Kurzzeitstabilität der internen Referenzfrequenz

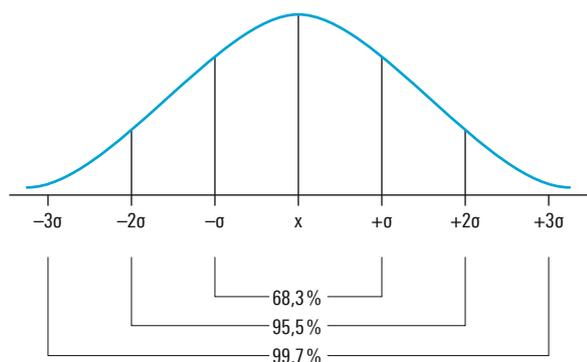


Korrelogramme konsekutiver Messungen mit schlechter Kurzzeitstabilität



Auswirkung auf die Hyperbeln

## Grafische Darstellung einer normalverteilten Größe



## Gemittelte Frequenzgenauigkeit (GPS-gestützt)

Ein weiterer wichtiger Parameter zur Angabe der Frequenzgenauigkeit ist der über mehrere Stunden gemittelte Wert. Dieser klärt, wie weit die interne Referenzfrequenz über längere Zeit tatsächlich von 10 MHz abweicht. Ist der interne Takt auf Dauer zu schnell oder zu langsam, wird die Genauigkeit der internen Uhrzeit beeinflusst. Bei minimal falscher Empfängeruhrzeit verläuft die berechnete Hyperbel nicht durch den tatsächlichen Herkunftsort des Signals. Beim R&S®ESMD beträgt die Frequenzgenauigkeit  $< \pm 5 \times 10^{-12}$ ;  $\pm 0,5 \times 10^{-12}$  (typ.; GPS-gestützt, gemittelt über 24 h).<sup>2)</sup>

Der Nutzer erhält trotz schlechter Langzeitstabilität und guter Kurzzeitstabilität der internen Referenzfrequenz ein stabiles Ortungsergebnis; es repräsentiert jedoch nicht den tatsächlichen Signalursprung. Da es für Ortungsergebnisse keine Qualitätsanzeige gibt, werden – aufgrund schlechter Langzeitstabilität und daraus resultierender Abweichung der internen Uhrzeit eines der Sensoren von der tatsächlichen Uhrzeit – alle Ortungsergebnisse immer „gleich falsch“ sein. Die interne Referenzfrequenz muss daher auch eine sehr gute Langzeitstabilität aufweisen.

Zusammenfassend lässt sich sagen: Je genauer die Frequenzgenauigkeit (gemittelt über mehrere Stunden) der internen Referenzfrequenz ist, desto weniger werden die Uhrzeiten unterschiedlicher Sensoren nach längerem Betrieb abweichen und umso genauer sind die Ortungsergebnisse des Systems.

## Rauschen und Linearität

Der Einfluss von Rauschen und Linearität wird bei der Betrachtung der für TDOA wichtigen Parameter oft vernachlässigt. Deren Auswirkungen sind weniger offensichtlich als zum Beispiel die der internen Referenzfrequenz. Die für jedes Funkerfassungs- und Spektrum-Monitoring-System zutreffenden Rahmenbedingungen gelten auch für ein TDOA-System. Die Genauigkeit hängt hier von der Band-

breite des zu ortenden Signals ab und fällt bei breitbandigen Signalen geringer aus.

Die Linearität des Funkerfassungsempfängers spielt besonders dann eine Rolle, wenn schwache Signale neben starken Signalen zu orten sind. Gerade in städtischer Umgebung, wo viele starke Signale vorhanden sind, ist das Großsignalverhalten eines Empfängers äußerst wichtig.

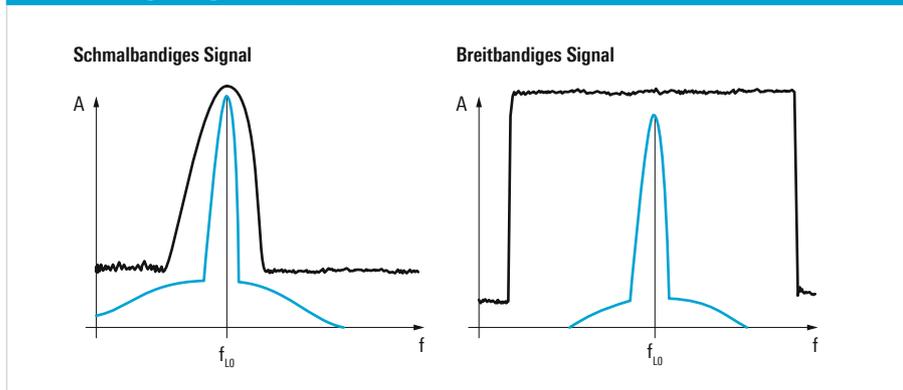
Das inhärente Rauschen eines Empfängers wirkt sich hauptsächlich auf dessen Empfindlichkeit aus: Die Erfassung und Ortung schwacher Signale erfordert eine sehr hohe Empfindlichkeit und eine niedrige Rauschzahl.

Bedingt durch die Kreuzkorrelation von I/Q-Daten verschiedener Empfänger eignet sich das TDOA-Prinzip für breitbandige Signale: Empfängereigenschaften zur Verringerung des Signal/Rausch-Abstandes sind bei der Ortung schmalbandiger Signale (ca.  $< 200$  kHz) entscheidend, da sie das Ortungsergebnis stärker beeinflussen.

Das trägernaher Phasenrauschen interner Oszillatoren im Empfänger ist ebenfalls zu berücksichtigen. Zur Umsetzung in den ZF-Bereich wird ein an der Antenne empfangenes Signal mehrfach mit den Signalen lokaler Oszillatoren im Empfänger multipliziert. Dabei wird die Qualität des empfangenen Signals durch das Phasenrauschen der lokalen Oszillatoren verschlechtert. Dies wird durch das Prinzip des Superheterodyn-Empfängers verursacht; im VHF/UHF-Frequenzbereich existiert dafür keine praktikable Alternativlösung. Der Einfluss des Phasenrauschens lässt sich durch die Verwendung rauscharmer Oszillatoren reduzieren. Phasenrauschen ist ein frequenz- und temperaturabhängiger Parameter, der von der eingestellten Bandbreite des Empfängers unabhängig ist. Das trägernaher Phasenrauschen wirkt sich – je nach Bandbreite des empfangenen Signals – unterschiedlich stark aus. Während das Phasenrauschen für breitbandige Signale nahezu vernachlässigbar ist; wird das Korrelationsergebnis durch trä-

<sup>2)</sup> Siehe technische Daten: PD 5213.9863.21.

## Unterschiedlicher Einfluss von Phasenrauschen (blau) auf schmal- und breitbandige Signale (schwarz)



gernahes Phasenrauschen bei schmalbandigen Signalen (ca. < 200 kHz) deutlich verschlechtert. Dies führt zu einer hohen Streuung bei der Ergebnisdarstellung; eine Ortung schmalbandiger Signale wird nahezu unmöglich.

Bei Verwendung eines TDOA-Ortungssystems in einer Stadt oder einer Umgebung mit vielen starken Signalen sind das Rauschen und die Linearität zu beachten. Sollen mit dem System auch schmalbandige Signale zuverlässig geortet werden, muss bei der Auswahl der Sensorik darauf geachtet werden, das trägernahes Phasenrauschen so gering wie möglich zu halten. Wird also ein Sensor mit schlechterem Großsignalverhalten in der Nähe eines starken Senders platziert, kann für den störungsfreien Betrieb der Einfluss starker Signale mittels externer Kanalfilter reduziert werden. Diese Lösung bedingt allerdings zusätzlichen Integrationsaufwand, da der Einfluss der Gruppenlaufzeit extern verwendeter Filter zusätzlich zu kompensieren ist. Die Genauigkeit des Zeitstempels wird sonst zu stark von den Laufzeiten des externen Filters beeinflusst. Bei der Planung eines TDOA-Systems sollte daher mehr als ein Sensor zur Verfügung stehen, um die Sensorik ohne zusätzlichen Aufwand an die Umgebungsbedingungen anpassen zu können.

## GPS

Das GPS-Signal wird in einem TDOA-Sensor zur Bestimmung des Sensorstandorts sowie zur Zeit- und Frequenzsynchronisation verwendet. Idealerweise können die Parameter des GPS-Moduls aus dem System heraus beeinflusst werden, um durch geeignete Mittelung der GPS-Signale sowohl die Orts- als auch die Zeitgenauigkeit zu erhöhen. Mit der Option R&S®ESMD-IGT internes GPS-Modul kann das GPS-Modul in unterschiedlichen Modi betrieben werden, um die Zeitgenauigkeit zu erhöhen. Die Einstellmöglichkeiten des GPS-Moduls enthält die Application Card „Erhöhung der Zeitstempelgenauigkeit für TDOA-Anwendungen“ (PD 3606.7530.91).

Für den Einsatz in einem TDOA-Netzwerk ist die Zeitgenauigkeit des GPS-Moduls entscheidend. Die interne Uhrzeit des TDOA-Sensors kann nicht genauer sein als die des zur Synchronisierung verwendeten GPS-Moduls. Daher ist die Angabe der Zeitgenauigkeit der GPS-Referenz in den technischen Daten des TDOA-Sensors zwingend erforderlich. In den meisten Datenblättern wird die Zeitgenauigkeit über die PPS-Genauigkeit angegeben. Dies ist die absolute Genauigkeit des PPS (Pulse Per Second) bezogen auf die koordinierte Weltzeit (UTC).

### Hinweis

Die Genauigkeit der GPS-Referenz bildet die Grundlage zur Erstellung eines Zeitstempels im I/Q-Datenstrom, da sie zur Synchronisierung der internen Uhr des TDOA-Sensors verwendet wird. In vielen Datenblättern von TDOA-Sensoren wird nur diese Genauigkeit angegeben. Eine Aussage über die Genauigkeit des Zeitstempels im I/Q-Datenstrom kann daraus allerdings nicht abgeleitet werden; diese muss separat bestimmt, gemessen und in den technischen Daten angegeben werden.

Die Angabe der horizontalen Positionsgenauigkeit des GPS-Moduls ist für TDOA-Anwendungen interessant, jedoch nicht entscheidend. Der im TDOA-System durch falsche Zeitinformation entstehende Fehler ist meist größer als der durch mangelnde Positionsgenauigkeit des verwendeten GPS-Moduls bedingte Fehler. Um Fehlerquellen bei der Emitter-Lokalisierung ausschließen zu können, ist die Angabe der horizontalen Positionsgenauigkeit des GPS-Moduls hilfreich.

### GPS (nur mit Option R&S®ESMD-IGT)

Empfängertyp	50 Kanäle, GPS L1 Frequenz, C/A Code, SBAS: WAAS, EGNOS, MSAS	
Horizontale Positionsgenauigkeit (CEP, 50%, 24 h statisch, -130 dBm, SEP < 3,5 m)	ohne Ergänzungssystem	2,5 m
	SBAS	2,0 m
PPS-Genauigkeit (bei gutem GPS-Signal)	RMS	30 ns
	99%	60 ns

## Zeitstempelgenauigkeit

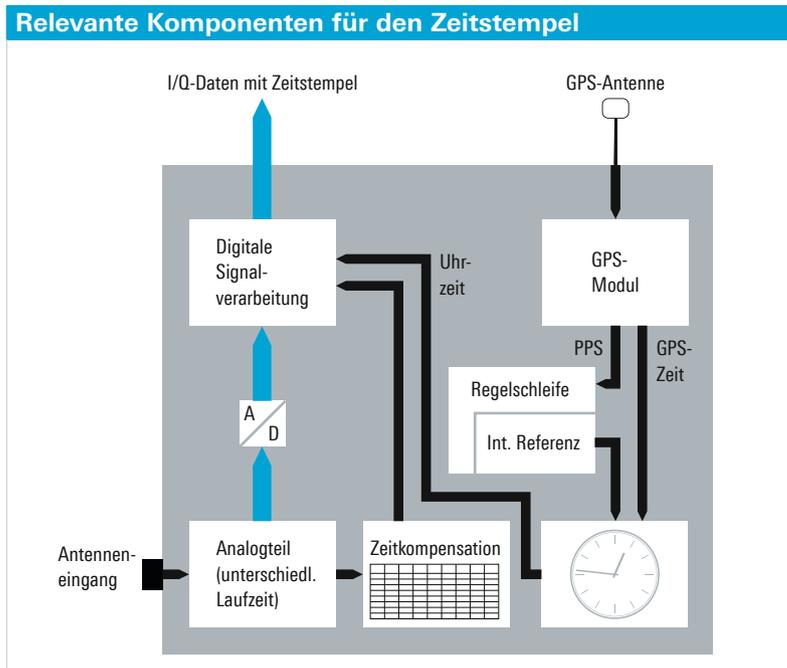
### Genauigkeit des Zeitstempels über der Frequenz

Die technischen Daten müssen die Zeitkompensation im Empfänger (siehe Seite 5) enthalten, sofern diese dort realisiert ist. Dabei sollte der gesamte Frequenzbereich betrachtet werden, da in unterschiedlichen Frequenzbereichen verschiedene Signalpfade im Empfänger verwendet werden. Dies stellt die größte Herausforderung für die Kompensation dar: Bei diesem Wert wird nicht gemessen, wie genau der Zeitstempel in Bezug auf die koordinierte Weltzeit (UTC) ist, sondern nur, wie genau der Zeitstempel den Ankunftszeitpunkt des Signals am Antenneneingang widerspiegelt. Je kleiner diese Abweichungen sind, desto weniger wird das Ortungsergebnis durch die interne Signalverarbeitung des Empfängers beeinflusst.

### Absolute Genauigkeit des Zeitstempels

Technische Daten müssen die absolute Genauigkeit des Zeitstempels in Bezug auf UTC enthalten. Dieser Wert umfasst die Einflüsse aller Parameter, die sich auf das Zeitverhalten des Empfängers auswirken: interne Referenzfrequenz, GPS-Synchronisierung und Zeitkompensation.

Damit ist der Zeitstempel der wichtigste Wert zur Qualifizierung eines Empfängers für TDOA-Zwecke. Er gibt absolut an, wie groß die Abweichung des auf den Antenneneingang bezogenen Zeitstempels von der UTC ist (Angabe mit statistischen Größen). Bei Addition aller Fehlerquellen in der Entstehung des Zeitstempels können die Abweichungen noch größer sein; ein garantierter Wert wäre dann deutlich größer als die spezifizierte Standardabweichung. Die Spezifikation mit einem statistischen Wert über mehrere Messungen ist realistischer, da in einem TDOA-System mehrere konsekutive Messwerte zur Ortsbestimmung verwendet werden (Erhöhung der Genauigkeit).



Zeitstempel		
Genauigkeit <sup>1) 2) 3) 4)</sup> des Zeitstempels über Frequenz	mit externer Referenzfrequenz in Bezug auf extern bereitgestellten PPS	
	20 MHz bis 50 MHz	< ±100 ns
	50 MHz bis 26500 MHz	< ±100 ns, ±50 ns (typ.)
	HF-Option	
	1 MHz bis 5 MHz	< ±200 ns
	5 MHz bis 32 MHz	< ±100 ns, ±50 ns (typ.)
Genauigkeit <sup>1) 2) 3) 4)</sup> des Zeitstempels, mit GPS-Unterstützung	Standardabweichung bei 2000 Messungen	< 10 ns

<sup>1)</sup> Gemessen mit 20 MHz ZF-Bandbreite, ZF-Equalizer aktiv, Demodulationsbandbreite 150 kHz.

<sup>2)</sup> Zeitstempel bezogen auf Antenneneingang.

<sup>3)</sup> Bedingungen: gutes GPS-Signal, konstante Position der GPS-Antenne, Position der GPS-Antenne bekannt mit Standardabweichung < 0,1 m, konstante Temperatur.

<sup>4)</sup> Frequenz 250 MHz. TDOA-Generator und Empfänger mit jeweils eigenen GPS-Antennen GPS-synchronisiert, identische Sicht auf die Satelliten.

# Zusammenfassung

Bei der Implementierung der für TDOA notwendigen Funktionen in Sensoren von Rohde&Schwarz wurden alle Anforderungen erfüllt.

Alle sich auf das Ortungsergebnis auswirkenden Empfangseigenschaften sind optimiert. Der Einsatz unterschiedlicher Sensoren erlaubt damit die einfache Anpassung eines Systems an die Umgebungsbedingungen, was wiederum die Flexibilität bei der Systementwicklung und die Qualität der Ortungsergebnisse erhöht.

Die von Rohde&Schwarz erhältlichen Sensoren sind für TDOA- oder Angle-of-Arrival-(AoA)-Ortungen verwendbar, um hybride Ortungssysteme zu realisieren. Je nach Anwendungsfall ist das passende Ortungsprinzip wählbar, um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen.

Die Datenblätter der Sensoren von Rohde&Schwarz enthalten alle wichtigen Parameter, um die Eignung in einem TDOA-System zu bewerten. Selbst Systeme mit unterschiedlichen Sensoren oder hybride Systeme lassen sich so ideal gestalten.

## Service mit Mehrwert

- Weltweit
- Lokal und persönlich
- Flexibel und maßgeschneidert
- Kompromisslose Qualität
- Langfristige Sicherheit

## Rohde & Schwarz

Der Elektronikkonzern Rohde & Schwarz ist ein führender Lösungsanbieter in den Arbeitsgebieten Messtechnik, Rundfunk, Funküberwachung und -ortung sowie sichere Kommunikation. Vor mehr als 75 Jahren gegründet ist das selbstständige Unternehmen mit seinen Dienstleistungen und einem engmaschigen Servicenetz in über 70 Ländern der Welt präsent. Der Firmensitz ist in Deutschland (München).

## Der Umwelt verpflichtet

- Energie-effiziente Produkte
- Kontinuierliche Weiterentwicklung nachhaltiger Umweltkonzepte
- ISO 14001-zertifiziertes Umweltmanagementsystem

Certified Quality System  
**ISO 9001**

## Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG

[www.rohde-schwarz.com](http://www.rohde-schwarz.com)

## Kontakt

- Europa, Afrika, Mittlerer Osten | +49 89 4129 12345  
[customersupport@rohde-schwarz.com](mailto:customersupport@rohde-schwarz.com)
- Nordamerika | 1 888 TEST RSA (1 888 837 87 72)  
[customer.support@rsa.rohde-schwarz.com](mailto:customer.support@rsa.rohde-schwarz.com)
- Lateinamerika | +1 410 910 79 88  
[customersupport.la@rohde-schwarz.com](mailto:customersupport.la@rohde-schwarz.com)
- Asien/Pazifik | +65 65 13 04 88  
[customersupport.asia@rohde-schwarz.com](mailto:customersupport.asia@rohde-schwarz.com)
- China | +86 800 810 8228/+86 400 650 5896  
[customersupport.china@rohde-schwarz.com](mailto:customersupport.china@rohde-schwarz.com)

R&S® ist eingetragenes Warenzeichen der Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG

Eigennamen sind Warenzeichen der jeweiligen Eigentümer

PD 3606.9162.91 | Version 01.00 | September 2013 (sk)

Anforderungen an Empfänger eines TDOA-basierten Ortungssystems

Daten ohne Genauigkeitsangabe sind unverbindlich | Änderungen vorbehalten

© 2013 Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG | 81671 München, Germany



3606916291