



Best Paper Award



ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und
Elektronikindustrie e.V. , Fachverband Automation

Steigerung der Robustheit drahtloser Sensor/Aktor-Feldbus- systeme durch prozessorientiertes adaptives Frequency-Hopping

Dr.-Ing. Ralf Heynicke, Dirk Krüger, Prof. Dr.-Ing. Gerd Scholl
Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg
Lehrstuhl für Elektrische Messtechnik

1 Einleitung

Funk in der Fertigung zur drahtlosen Sensor/Aktor-Ansteuerung muss gleichzeitig vielen Anforderungen gerecht werden. Drei besonders wichtige Merkmale sind: kurze Reaktionszeiten im Bereich von 5 ms – 10 ms, Paketfehlerraten im Bereich von 10^{-9} und Koexistenz mit anderen, in der Fertigung eingesetzten Funksystemen, wie z.B. WLAN, Bluetooth oder WirelessHART. Einen wichtigen Beitrag hierzu können prozessorientierte adaptive Frequency-Hopping-Algorithmen liefern. Hierunter sind Frequency-Hopping-Algorithmen zu verstehen, die nicht fest vom Funksystem vorgegeben werden, sondern die sich auf den industriellen Prozess adaptiv und dynamisch einstellen. Für die Entwicklung derartiger Algorithmen sind fundierte Kenntnisse über die Eigenschaften des Indoor-Funkkanals im industriellen Umfeld notwendig. Um entsprechende Informationen zu gewinnen, wurde ein Funk-Messsystem entwickelt, Daten in verschiedenen industriellen Umgebungen erfasst und ausgewertet. Basierend auf diesen Analyseergebnissen wurde ein drahtloses Sensor/Aktor-Netzwerk für die Fertigungsautomatisierung realisiert, das in der Lage ist, sich adaptiv auf den zeitvarianten, frequenzselektiven Funkkanal einzustellen. Aus den Analyseergebnissen konnten auch Verfahren abgeleitet werden, welche die deterministischen Anteile der Veränderungen der Funkkanäle nutzen, um Zeit- und Frequenzschlitze mit ausreichend guten Übertragungseigenschaften auszuwählen. Werden diese Verfahren mit „Black- bzw. Whitelists“ kombiniert, lassen sich sowohl Robustheit als auch die Koexistenzfähigkeit von industriellen Funksystemen erheblich verbessern. In diesem Artikel wird das Verfahren anhand eines repräsentativen Laboraufbaus dargestellt und die möglichen Performanceverbesserungen abgeschätzt.

2 Der Funkkanal

Im Folgenden wird bei der Betrachtung des Indoor-Funkkanals von einer Fertigungszelle mit den Abmaßen von ca. 5 x 5 x 3 m³ ausgegangen. In dieser Fertigungszelle sind unterschiedliche Sensoren und Aktoren aktiv, deren Verteilung im Raum von der jeweiligen Applikation abhängt. Aus den geometrischen Abständen lassen sich gemäß Friis die Pfadverluste zwischen Basisstationsantenne und Sensor/Aktor-Knoten bestimmen:

$$P_2 = P_1 + G_1 + G_2 + 20 \log \left(\frac{\lambda / 4\pi}{1\text{m}} \right) + 10 \cdot n \cdot \log \left(\frac{1\text{m}}{R} \right). \quad (1)$$

Hierin kennzeichnen P_1 und P_2 die Sende- und Empfangsleistungen, angegeben in dBm, G_1 und G_2 den Antennengewinn der Sende- bzw. Empfangsantenne, angegeben in dBi, und λ die elektromagnetische Wellenlänge, angegeben in Meter. R ist der Abstand der Sensor/Aktor-Knoten von der jeweiligen Basisstationsantenne in Metern. Der Parameter n kennzeichnet hierbei den Ausbreitungskoeffizienten und wird im klassischen Friisschen-Modell zu $n = 2$ gewählt [1].

Aufgrund von z.B. metallischen Aufbauten, Rohren für Medienzuführungen, sich bewegenden Robotern und umgebenden Wänden ist die elektromagnetische Ausbreitung innerhalb einer Fertigungszelle durch eine starke Mehrwegeausbreitung geprägt. Diese ist von der Größe, Anzahl und Position der Abschattungs- bzw. Streukomponenten sowie deren Geschwindigkeiten abhängig. Dies führt zu beliebig komplexen Zusammenhängen, die daher nur stochastisch beschrieben werden können. Besteht zwischen der Basisstation und den abgesetzten Sensor/Aktor-Knoten eine mehr oder weniger gute direkte Sichtverbindung (engl.: Line of Sight, LOS), so führt dies zu einer relativ starken Signalkomponente, der sich gestreute, reflektierte und gebeugte Signalkomponenten überlagern. Die Wahrscheinlichkeitsdichte der lokal verteilten Feldstärke $E(x,y,z)$ kann näherungsweise mit Hilfe der Rice-Verteilung [2] beschrieben werden. Kommt die Verbindung dagegen nur über Streukomponenten (engl.: No Line Of Sight, NLOS) zustande, entspricht die Verteilung der Feldstärke einer klassischen Rayleigh-Verteilung [3].

Viele industrielle Prozesse haben einen zyklischen Charakter, der allerdings dem Funksystem nicht bekannt ist. Daher werden diese Prozesse in der Regel statistisch beschrieben. Eine stochastische Beschreibung des Funkkanals beurteilt die zu erwartende Qualität des Funkkanals natürlicherweise über ein Wahrscheinlichkeitsmaß. Es wird gezeigt, dass aus den vermeintlich zufällig verteilten Feldstärkewerten deterministische Anteile extrahiert werden können, so dass über eine geschickte Wahl der Zeit- und Frequenzschlitze die Robustheit des Funksystems erheblich gesteigert werden kann. Anhand von Laboraufbauten wurden zyklisch ablaufende Prozesse mit Hilfe eines Kanalmesssystems vermessen.

3 Das Messsystem

In Fig. 1 ist das Grundprinzip des implementierten MCCW-Messverfahrens (MCCW = Multi-Carrier Continuous Wave) dargestellt. Das MCCW-Signal wird über eine Sendeantenne vom Generator abgestrahlt. Am Empfänger wird die durch den Funkkanal verursachte Veränderung der Phase und Amplitude jedes einzelnen Trägers gemessen. Daraus folgt unmittelbar die frequenzdiskretisierte Übertragungsfunktion $H(f)$. In Fig. 1 kennzeichnet $|X(f)|$ den Betrag des Sendespektrums, $|H(f)|$ den Betrag der Übertragungsfunktion des zu vermessenden Funkkanals und $|Y(f)|$ den Betrag des gemessenen Empfangsspektrums.

Für den Empfang des MCCW-Signals können herkömmliche IQ-Demodulatoren eingesetzt werden, die allerdings die relativ hohe Bandbreite unterstützen müssen. In unserem Messsystem kam der Vector-Signal-Generator SMU 200A der Firma Rohde und Schwarz als Sender und der Real-Time-Spektrum-Analysator RSA6106A (VSA) der Firma Tektronix als Empfänger zum Einsatz, der über eine Eingangsbandbreite von 110 MHz verfügt.

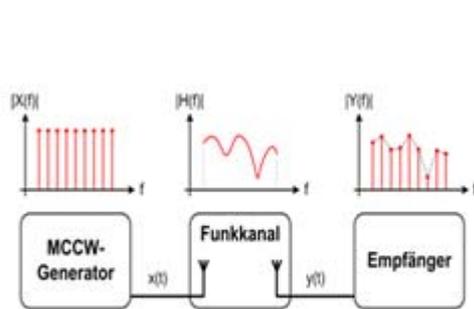


Fig. 1 Prinzip des Funkkanalmesssystems

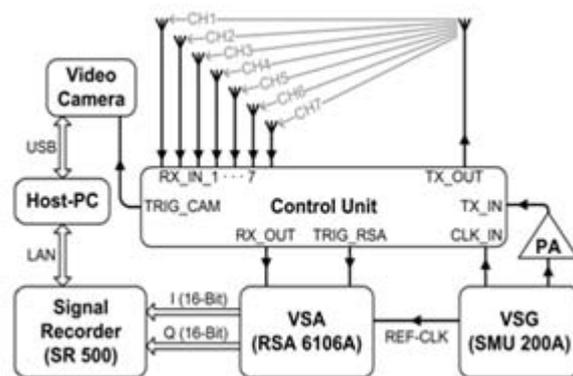


Fig. 2 Schematische Darstellung des Messsystems

Um die Übertragungsfunktion des Funkkanals aus dem abgetasteten Empfangssignal zu ermitteln, muss die diskrete Fourier-Transformierte $X(m)$ berechnet werden. Diese ist für ein beliebiges zeitdiskretes Signal $x(n)$ wie folgt definiert [4]:

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N_s-1} x(n) \cdot \exp\left(-j2\pi \frac{n \cdot m}{N_s}\right). \quad (2)$$

Hierbei kennzeichnet N_s die Anzahl der Abtastwerte. Damit keine „Leckeffekte“ im diskreten Spektrum $X(m)$ auftreten, muss $x(n)$ im Regelfall vor der Transformation mit einer Fensterfunktion gewichtet werden, was zu einer Verschleifung des Signalspektrums führt, so dass die Trennschärfe für die einzelnen Trägerfrequenzen verloren geht [4]. Die Notwendigkeit der Fensterung entfällt jedoch, wenn die DFT nur von einem Ausschnitt des periodischen Signals berechnet wird, wobei die Periodendauer ein ganzzahliges Vielfaches der Ausschnittlänge sein muss.

Der komplette Messaufbau ist in Fig. 2 schematisch dargestellt. Die mit einer Gesamtdatenrate von 600 MB/s erzeugten Daten werden mittels eines Datenloggers

aufgenommen und auf sehr schnellen Festplatten-Arrays (bis zu 800MB/s) gespeichert. Die Gesamtspeicherkapazität von ca. 10TB ermöglicht eine mehrstündige Aufnahmedauer. Am Ende einer Aufnahme können die gespeicherten Rohdaten im Datenlogger verarbeitet werden. Da der Datenlogger PC-basiert aufgebaut ist, kann die Datenverarbeitung mit Standardprogrammiersprachen wie C/C++ erstellt werden. Über eine LAN-Schnittstelle wird der Datenlogger von einem Host-PC angesteuert. Zur besseren nachträglichen Auswertung wird die Messumgebung synchron zur Messung von einer Videokamera (VC) mit einer Bildrate von 25 1/s aufgezeichnet. Zur zeitgleichen Messung von bis zu 7 Funkkanälen verfügt das Messsystem über 1 Sende- und 7 Empfangsantennen. Die in Fig. 2 dargestellte Steuereinheit (Control Unit) hat die Aufgaben:

- Umschaltung zwischen den Empfangsantennen,
- Vorverstärkung des Empfangssignals,
- Erzeugen eines Triggersignals zur Synchronisation,
- Triggerung des Vector-Signal-Analyzers.

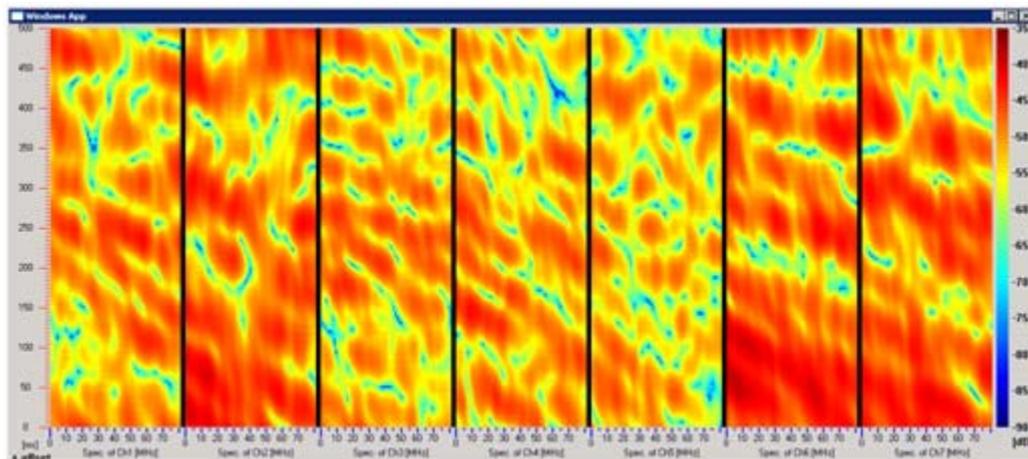


Fig. 3 Sieben zeitgleich vermessene Funkkanäle im 2,45 GHz-Band

Der Gesamtzyklus des HF-Umschalters für die Umschaltung zwischen den sieben Empfangsantennen beträgt $100 \mu\text{s}$. Die während der Messung aufgenommenen Daten werden im ersten Schritt zur Ermittlung der komplexen zeitvarianten Übertragungsfunktionen der sieben gemessenen Funkkanäle unmittelbar auf dem Datenlogger ausgewertet. In Fig. 3 ist das Ergebnis einer Messung für sieben gleichzeitig aufgenommene Funkkanäle über einen Zeitraum von 0,4 s dargestellt. Es sind deutlich die Auswirkungen der Mehrwegeausbreitung auf die zeitlichen und spektralen Verläufe der Übertragungsfunktionen der dargestellten Funkkanäle zu erkennen. Die grünen und blauen Bereiche kennzeichnen die Zeiten und Frequenzen, bei denen mit einer erhöhten Übertragungsfehlerwahrscheinlichkeit gerechnet werden muss. Diese Bereiche sollten deshalb bei der Funkübertragung gemieden werden, um die Anforderungen bezüglich kurzer Reaktionszeiten und einer hohen Zuverlässigkeit nicht zu gefährden. Wie Fig. 3 zu entnehmen ist, ziehen sich die Einbrüche im Funkkanal zeitweise über das komplette ISM-Band. Das Sensor/Aktor-Funksystem

Für das realisierte Funksystem wurde eine sternförmige Topologie gewählt. Die Basisstation (BS), die als Master beim Datenaustausch mit den abgesetzten Sensor/Aktor-Module (SAM) agiert, bildet gleichzeitig die Schnittstelle zum übergeordneten Prozessleitsystem. Die innerhalb der Fertigungszelle verteilten SAMs agieren als Slaves. Die BS ist modular aufgebaut und verfügt über 1 bis 10 Schmalband-Funk-Transceiver (TRX) und eine Steuereinheit für deren Koordination und Synchronisation sowie für den Datenaustausch zwischen der drahtgebundenen und der drahtlosen Kommunikationsebene. Der Parallelbetrieb der Transceiver ermöglicht mehrere Sensor/Aktor-Module zeitgleich innerhalb eines Frequenzbandes und/oder über einzelne Frequenzbänder hinweg anzusprechen.

Die prinzipielle Struktur der modular aufgebauten BS ist in Fig. 4 dargestellt. Zentrales Element ist ein FPGA vom Typ Xilinx-Spartan III. Eine JTAG-Schnittstelle ermöglicht Programmierung und Debugging. Über General Purpose IO-Pins (GPIOs) wurden verschiedene Schnittstellen für den Datenaustausch der BS mit der Peripherie realisiert. Der µBlaze, ein 32 Bit RISC Soft-Microcontroller, steuert den Medienzugriff (MAC). Zudem bietet der FPGA die Möglichkeit einer ersten Auswertung bzw. Vorverarbeitung von Sensordaten für besonders zeitkritische Applikationen. Ein kleiner Teil des Datenaustauschs mit dem µBlaze erfolgt über den Processor Local Bus (PLB), einen Standardbus des FPGAs. Der überwiegende Anteil an Daten des µBlaze wird allerdings über einen modifizierten Local Memory Bus (LMB) ausgetauscht.

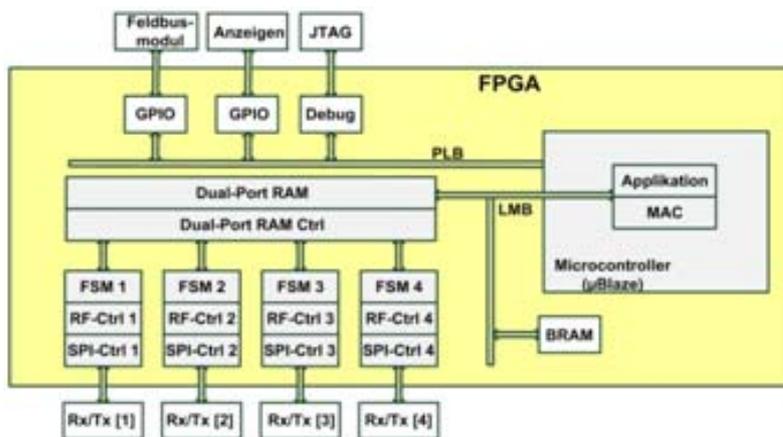


Fig. 4 Basisstation mit vier angeschlossenen HF-Transceivern

Mit einer Rate von bis zu 1,2 GBit/s werden Daten vom µBlaze in das Dual-Port-RAM (DPR) geschrieben bzw. vom DPR ausgelesen, so dass Systembefehle zeitlich entkoppelt von der Applikation abgearbeitet werden können. Auf der anderen Seite des DPR erfolgt ein Datentransfer mit den VHDL-Modulen FSM 1 – FSM 4. Diese vier Software-Module konfigurieren und steuern

die daran angeschlossenen HF-Transceiver. Auch bei der Realisierung der Sensor/Aktor-Module wurde konsequent auf Modularität geachtet. Diese können wahlweise mit 8 digitalen Ein- bzw. Ausgängen (IOs) oder 2 analoge IOs mit jeweils 12 Bit Amplitudenauflösung konfiguriert werden. An die Sensor/Aktor-Module können über verschiedene Schnittstellen Messfühler verschiedener Standards angeschlossen werden.

4 Adaptive Hopping-Sequenzen

Im Indoor-Bereich, speziell in industrieller Umgebung, ist die Funkübertragungsfunktion $H(t,f)$ aufgrund der starken Mehrwegeausbreitung und eines sich ständig bewegenden Umfelds bzw. sich bewegender Sensor/Aktor-Knoten durch starke zeitliche Schwankungen und mitunter tiefe Einbrüche über der Frequenz geprägt. Damit ist die Wahrscheinlichkeit groß, bei einem Frequenzwechsel einen Funkkanal mit hoher Einfügedämpfung zu treffen. Über rein stochastische Größen wie die Kohärenzbandbreite und Kohärenzzeit lassen sich Maßzahlen ermitteln, wie groß die Sprünge in der Zeit bzw. Frequenz gewählt werden müssen, um im Mittel mit hoher Wahrscheinlichkeit wieder einen hohen Signalpegel zu erhalten. Wäre dagegen der zeitliche und spektrale Verlauf des Betrags der Übertragungsfunktion bekannt, könnten gezielt zeitlich gestaffelt die Frequenzen mit hohem Signalpegel angesteuert werden. D.h. Frequenz- und Zeitschlitzte der einzelnen Kommunikationspakete könnten prozessadaptiv so ausgewählt werden, dass der Signalpegel (Radio Signal Strength Indicator, RSSI) am Empfänger jeweils maximal ist. Statistisch ausgedrückt bedeutet dies einen Anstieg im mittleren Pegel des RSSI, einhergehend mit einer starken Abnahme der Varianz der RSSI-Werte. Dies hat mehrere Vorteile:

- Reduzierung der Fehlerwahrscheinlichkeiten und folglich der Reaktionszeiten des Funksystems.
- Erhöhung der Reichweite bei gleicher Sendeleistung.
- Reduzierung des Energiebedarfs bzw. Erhöhung der Batterielebensdauer bei reduzierter Sendeleistung.
- Reduzierte Belegung des Funkkanals aufgrund dessen, dass weniger Paketwiederholungen benötigt werden.

Die mit dem Messsystem durchgeführten Untersuchungen in unterschiedlichsten industriellen Umgebungen haben gezeigt, dass bei vielen Applikationen im Fertigungsumfeld das Verhalten des Funkkanals über der Zeit charakteristische, häufig periodische Änderungen aufweist. Das bedeutet, dass bei genauer Beobachtung des Funkkanals bzw. der RSSI-Werte der einzelnen Transceiver aus dem vermeintlich rein zufälligen Muster der Feldstärken charakteristische, immer wiederkehrende Muster abgelesen werden können. Ein solcher Fall tritt z. B. auf, wenn ein Funkknoten auf einen Roboterarm montiert wurde, und der Roboter in jedem Prozesszyklus, wie das typischerweise der Fall ist, immer wieder dieselbe Bewegung ausführt. Damit ändern sich Reflexionen, Beugungs- und Abschattungseffekte in jedem Prozesszyklus immer auf dieselbe Art und Weise. Um das Verhalten des Funkkanals über der Zeit und der Frequenz in ausreichendem Maß zu charakterisieren, muss der RSSI-Wert ausreichend häufig ausgelesen werden. Ein geeignetes Maß für die notwendige Anzahl der Stützstellen über der Zeit bzw. über der Frequenz ist wieder die Kohärenzzeit bzw. die Kohärenzbandbreite, die hauptsächlich durch die räumlich geometrischen Veränderungen in unmittelbarer Umgebung der Funktransceiver dominiert werden.

Die Messungen haben weiter gezeigt, dass das Verhalten des Funkkanals im industriellen Umfeld grob in drei Klassen eingeteilt werden kann.

- In der ersten Klasse verhält sich der Funkkanal „quasistatisch“, d.h. der zeitveränderliche Anteil fällt nicht oder nur schwach ins Gewicht. Hier lässt sich die Übertragungsfunktion auf den frequenzselektiven Anteil $H(f)$ reduzieren.
- In der zweiten Klasse sind aus dem pseudo-zufälligen dynamischen Verlauf der Übertragungsfunktion (wiederkehrende) charakteristische Muster aufgrund einer immer wieder durchgeführten Bewegung innerhalb eines Fertigungszyklus zu erkennen.
- Bei der dritten Klasse lassen sich aus dem Verhalten des dynamischen Funkkanals keinerlei Gesetzmäßigkeiten erkennen. Es treten lediglich zeitlich unkorrelierte spontane Zustandsänderungen auf.

In einem quasistatischen Umfeld kann die Übertragungsfunktion $H(f)$ zu jedem Zeitpunkt mit ausreichender Genauigkeit, z. B. mit Hilfe eines Netzwerkanalysators, erfasst werden. Für die Auslegung des Funksystems bedeutet dies, dass mit einer einmaligen Vermessung der Funkkanäle bzw. mit einer einmaligen Auswertung der RSSI-Werte innerhalb einer Startup-Routine gezielt Frequenzen ausgewählt werden können, bei denen das Empfangssignal der Sensor/Aktor-Module immer über einem definierten Pegel liegt.

An die Basisstation sind allerdings mehrere Funkmodule (zum Teil über Hundert) angebunden. Dies hat zur Folge, dass die Funkmodule zu Gruppen zusammengefasst werden müssen, die dann zeitlich nacheinander auf derselben Frequenz angesteuert werden. D.h. für eine Gruppe von Sensor/Aktor-Modulen muß eine Teilmenge des möglichen Frequenzspektrums so ausgewählt werden, dass die RSSI-Werte aller Gruppenmitglieder zu jeder Zeit über einem bestimmten Signalpegel liegen. In Fig. 5 sind exemplarisch die RSSI-Werte von vier Sensor/Aktor-Modulen dargestellt.

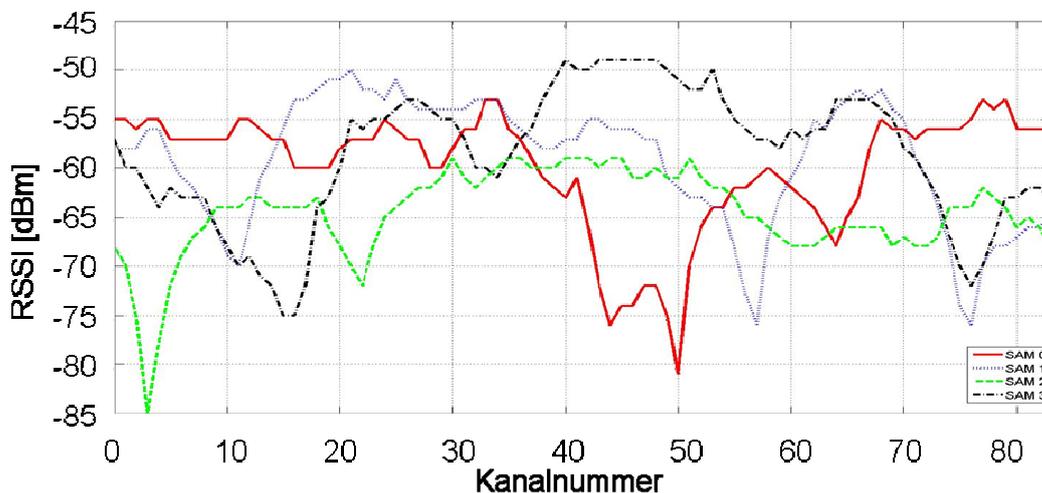


Fig. 5 Verlauf der RSSI-Werte über der Frequenz (80 Kanäle im Abstand von jeweils einem MHz) von vier Funkverbindungen zwischen vier Sensor/Aktor-Modulen und der Basisstation

Bei der Gruppenbildung müssen zusätzlich neben dem RSSI-Wert noch andere Parameter wie z. B. die Kohärenzbandbreite, Störabstände sowie „Black- und Whitelisting“ berücksichtigt werden. Im Ergebnis wird beim Startup des Funksystems

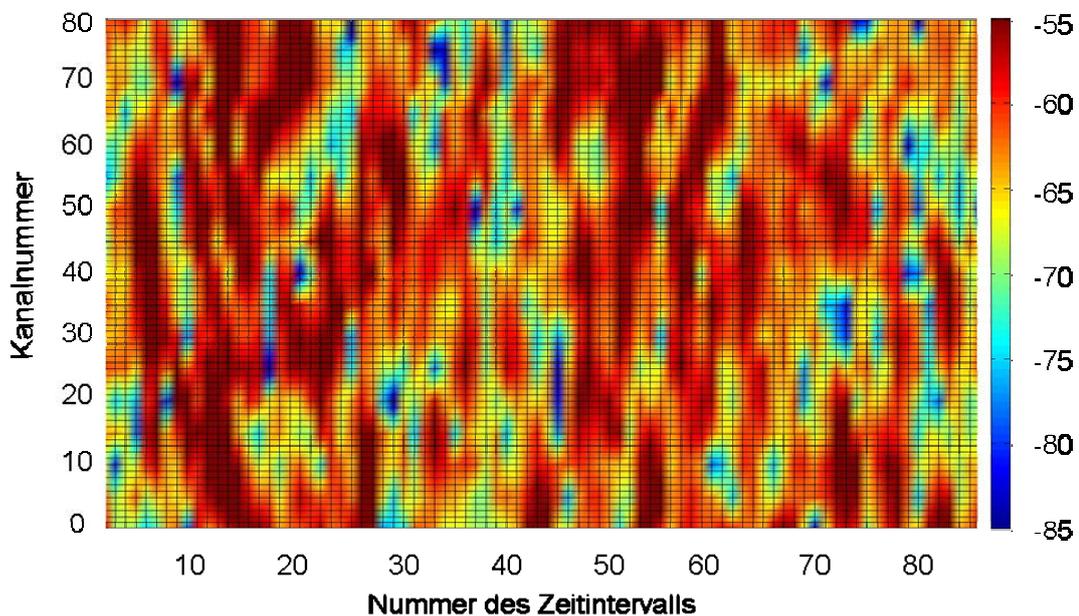


Fig. 6 Zeitvariante, frequenzselektive Übertragungsfunktion eines zyklischen Prozesses. Die Graphik zeigt die dynamisch aufgenommenen RSSI-Werte mit Hilfe des Funksystems

für jeden Sensor/Aktor-Knoten eine Frequenztafel erstellt und diesem vor dem Standard-Betrieb innerhalb einer Konfigurationsroutine übermittelt.

Messungen in verschiedenen Applikationen haben die Funktionsfähigkeit dieses Verfahrens mehrfach bestätigt. Der RSSI-Wert konnte im Vergleich zu einem reinen Zufalls-basierten Hopping-Algorithmus durchschnittlich um 6 – 9 dB angehoben werden, wobei insbesondere kleine RSSI-Werte vermieden werden konnten, die hauptsächlich für die auftretenden Übertragungsfehler verantwortlich sind.

Typische Applikationen im Automatisierungsumfeld, die in die zweite Klasse fallen, sind z. B. Sortierteller oder Werkzeugwechsler. Ist der deterministische Anteil der Veränderungen groß genug, kann die Übertragungsfunktion $H(t,f)$ anstatt über der Zeit über den zeitlichen Fortschritt im Prozesszyklus beschrieben werden. Hierbei kann weiter unterschieden werden zwischen rein zyklischen Prozessen und Prozessen, die von einem bestimmten Ereignis angestoßen werden und danach immer gleich ablaufen. Bei rein zyklischen Prozessen ist der Verlauf des Betrags der Übertragungsfunktion über der Frequenz im Abstand der Zykluszeit immer identisch. Dies bedeutet, dass auch im dynamischen Fall bei dieser Art von Prozessen der Funkkanal, wenn er über mindestens einen Prozesszyklus aufgezeichnet wurde, vollständig charakterisiert ist. Fig. 6 zeigt die an der BS von einem Sensor/Aktor-Modul empfangenen RSSI-Werte über der Frequenz und der Zeit von einem zyklisch ablaufenden Prozess. Die Geschwindigkeit des Sensor/Aktor-Moduls beträgt ca. 3 m/s, Die Prozess-Zykluszeit von 1,5 s wurde für die Darstellung in 84 Zeitabschnitte unterteilt.

Derselbe Prozess wurde ein weiteres Mal durchlaufen, allerdings wurde er immer wieder angehalten und die Übertragungsfunktionen zwischen den Sensor/Aktor-Knoten statisch mit Hilfe eines Netzwerkanalysators vermessen (Geschwindigkeit des Sensor/Aktor-Knotens = 0 m/s). Ein Vergleich beider Ergebnisse zeigte eine hohe Übereinstimmung zwischen beiden Messmethoden.

Für die Ermittlung der adaptiven Hopping-Sequenz müssen die Sensor/Aktor-Knoten wieder in Gruppen mit hoher Ähnlichkeit in der Übertragungsfunktion aufgeteilt werden. Anschließend werden für die einzelnen Gruppen die möglichen Frequenzen derart ermittelt, dass die Sensor/Aktor-Module mit den schlechtesten Übertragungseigenschaften bei den ausgewählten Frequenzen über einen maximal möglichen RSSI verfügen. Die adaptive Hopping-Sequenz wurde so in das Funksystem implementiert, dass Schwankungen der Hopping-Sequenz automatisch vom Funksystem abgefangen werden.

Zur Validierung der adaptiven Hopping-Sequenz wurden zwei unterschiedliche Hopping-Sequenzen implementiert, ein zufällig ausgewählter starrer Hopping-Algorithmus und eine Hopping-Sequenz, die sich adaptiv auf den Prozess einstellt. Das Ergebnis ist in Fig. 7 beispielhaft anhand der Frequenzwahl einer Gruppe von Sensor/Aktor-Modulen dargestellt. Die roten Punkte markieren die Zeitpunkte und die gewählten Frequenzen des starren Algorithmus und die grünen Punkte, die Zeiten und Frequenzen der adaptiven Hopping-Sequenz. Es ist deutlich zu erkennen, dass die adaptive Hopping-Sequenz Frequenzen mit den höchstmöglichen RSSI-Werten für die Funkübertragung wählt. Im Gegensatz dazu weisen beim starren Algorithmus einige Stützstellen sehr geringe RSSI-Werte auf.

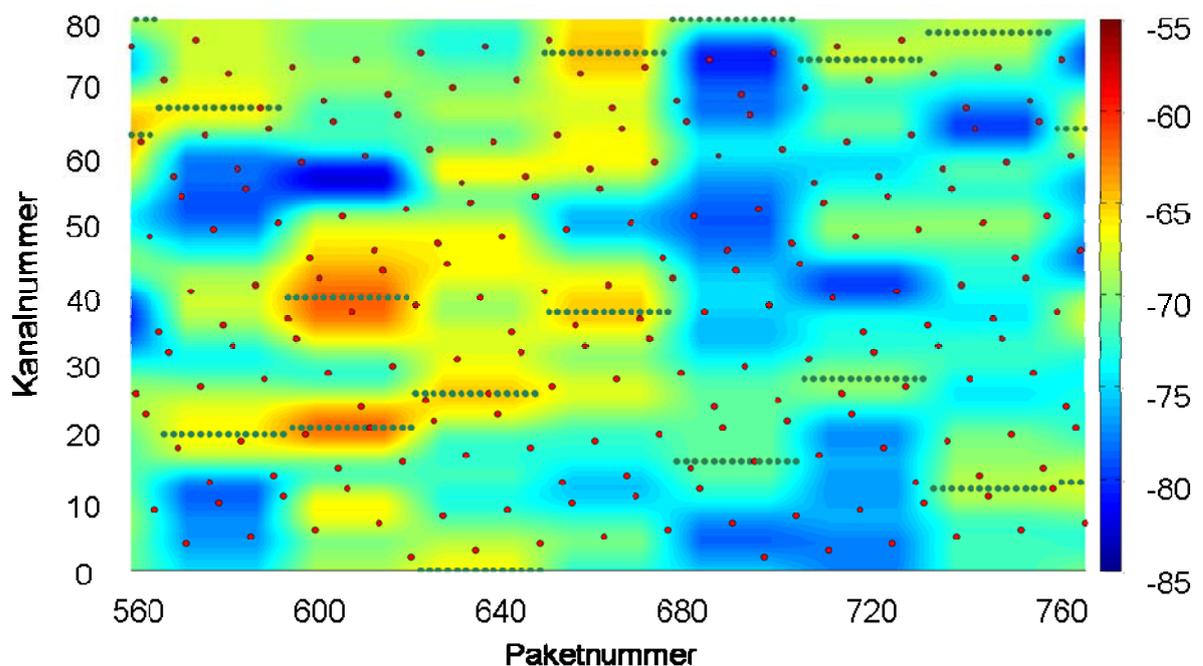


Fig. 7 Vergleich der Frequenzwahl mit Hilfe eines starren Hopping-Algorithmus (stochastische Punkteverteilung) und einer adaptiven Hopping-Sequenz (Punktezüge)

In Fig. 8 ist die Häufigkeitsverteilung der RSSI-Werte dargestellt. Das obere Diagramm zeigt die RSSI-Werte der adaptiven Hopping-Sequenz, das untere Diagramm die RSSI-Werte der statischen Hopping-Sequenz. Es ist deutlich ersichtlich, dass neben der Steigerung des mittleren RSSI-Wertes auch die Varianz der RSSI-Werte bei der adaptiven Hopping-Sequenz wesentlich geringer ist. Insbesondere die schlechtesten RSSI-Werte konnten um ca. 11 dB gegenüber dem starren Algorithmus angehoben werden. Diese Steigerung hat entscheidende Auswirkungen auf die Spezifikationen des Funksystems. Bei gleicher Sendeleistung ist bei Verwendung der adaptiven Hopping-Sequenz die Reichweite bei gleicher Empfangsfeldstärke fast viermal so hoch. Wird die Sendeleistung auf das für eine fehlerfreie Übertragung notwendige Maß reduziert, so kann diese um den Faktor 12 gegenüber der notwendigen Leistung beim starren Algorithmus reduziert werden. Dies führt auch zu einer erheblich verbesserten Koexistenzfähigkeit des Funksystems.

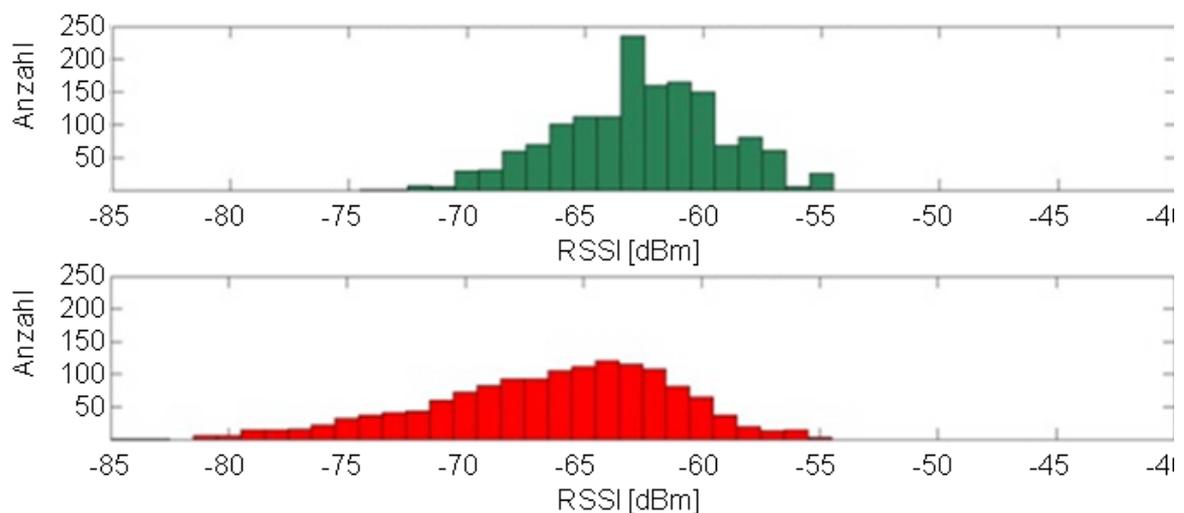


Fig. 8 Häufigkeitsverteilungen der RSSI-Werte der adaptiven Hopping-Sequenz

5 Zusammenfassung

Untersuchungen und erste Realisierungen haben gezeigt, dass eine Steigerung der Robustheit drahtloser Sensor/Aktor-Funksysteme durch prozessorientiertes adaptives Frequency-Hopping in vielen Umgebungen möglich ist. Die Messungen zeigen Steigerungen der RSSI-Werte um durchschnittlich 6 dB. Insbesondere die RSSI-Werte der Funkkanäle mit den höchsten Fehlerhäufigkeiten können durch adaptive Hoppingsequenzen um ca. 11 dB erhöht werden. Daraus resultieren Möglichkeiten der Verbesserung der Koexistenz, Reichweite und Energie-Effizienz von drahtlosen Sensor/Aktor-Feldbussystemen.

6 Literatur

- [1] Sheikh, A.U.H.: Wireless Communications: Theory and Techniques. Norwell: Kluwer, 2004
- [2] David, K.; Benkner, T.: Digitale Mobilfunksysteme. Stuttgart: Teubner, 1996
- [3] Bello, P. A.: Characterization of randomly time-variant linear channels. IEEE Trans. Comm. Syst., Bd. CS-11, Nr. 4, S. 360- 393, 1963
- [4] Jakes, W.C.: Microwave Mobile Communications. J.Wiley, 1974