

高信頼・低遅延な無線通信技術

青山哲也* 木下裕介*
鈴木和雅* 武 啓二郎**
梅田周作*

Reliable and Low-latency Technologies for Wireless Communication

Tetsuya Aoyama, Kazumasa Suzuki, Shusaku Umeda, Yusuke Kinoshita, Keiji Take

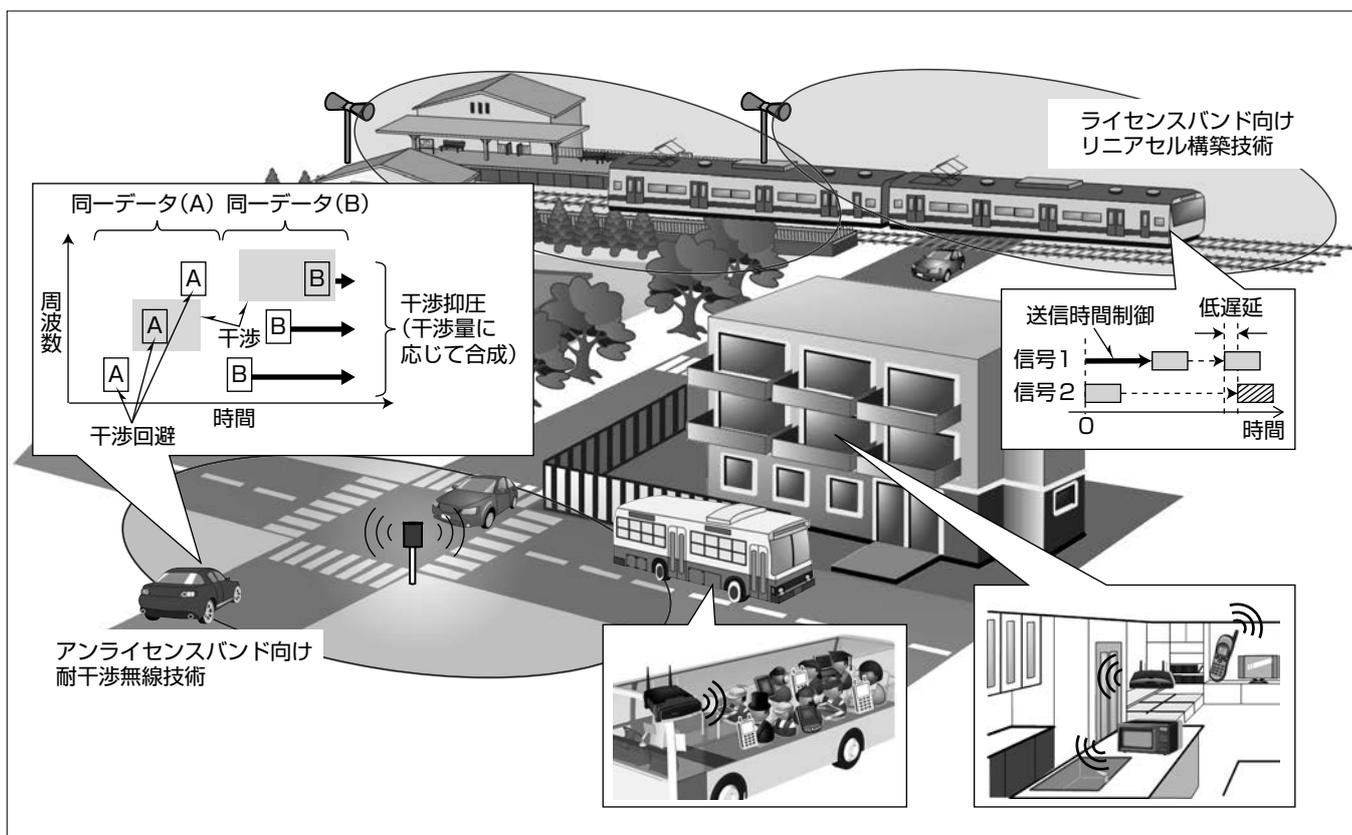
要 旨

様々なモノがセンサと無線通信を介してインターネットの一部を構成するIoT(Internet of Things)では、道路や鉄道、ビルや工場、橋などの社会インフラに設置された機器を、無線通信によって接続し、収集した様々なデータを分析することで、新たな価値を創出することが期待されている。設置利便性やリアルタイム性、信頼性が必要となる社会インフラ全体にIoT化を進めるには、高信頼・低遅延な無線通信技術が求められる。

無線通信は、無線局の免許が必要なライセンスバンドを用いるものと、一定の規格を満たすことで無線局の免許が不要なアンライセンスバンドを用いるものに分けられる。

社会インフラ全体にIoT化を進めるには、ライセンスバンドとアンライセンスバンドのそれぞれを用途によって使い分けるとともに、高信頼・低遅延化技術の適用が必要となる。

ライセンスバンド向けのリニアセル構築技術は、鉄道や高速道路等の高速移動体向けに、ミリ波帯の持つ直進性にセル内/セル間干渉対策を行うことで大容量、高信頼な無線通信を実現する。アンライセンスバンド向けの耐干渉無線技術は、干渉回避と干渉抑圧によって無線LAN(Local Area Network)等のアンライセンスバンドを用いる機器からの電波干渉に対する耐性を高めた高信頼無線通信を実現する。



社会全体のIoT化を支える高信頼・低遅延な無線通信

鉄道や高速道路等の高速移動体向けにミリ波を用いたライセンスバンド向けリニアセル構築技術と、干渉回避と干渉抑圧によって無線LAN等からの電波干渉に対する耐性を高めたアンライセンスバンド向け耐干渉無線技術によって、高信頼・低遅延な無線通信を実現する。

1. ま え が き

様々なモノがセンサと無線通信を介してインターネットの一部を構成するIoTでは、道路や鉄道、ビルや工場、橋などに設置された機器を、ネットワークを介して接続し、収集した様々なデータを分析することで、新たな価値を創出することが期待されている。社会インフラの基盤となる制御システムでは、リアルタイム性や信頼性が求められることから、従来は伝送路の外乱対策として有線によるネットワーク化が進められていた。今後は設置の利便性や、移動環境も含めた社会インフラ全体のネットワーク化の観点から無線化が進められ、これに伴い高信頼・低遅延な技術が求められる。

無線通信システムは、無線局の免許が必要なライセンスバンドを用いるものと、一定の規格を満たすことで無線局の免許が不要なアンライセンスバンドを用いるものに大きく分けられる。ライセンスバンドを用いるシステムとしては、携帯電話や列車無線等の移動体通信が知られている。アンライセンスバンドを用いるシステムとしては、無線LANやBluetooth^(注1)、ZigBee^(注2)、Wi-SUN^(注3)(Wireless Smart Utility Network)などが知られている。

IoT化を推進する上で、社会インフラ全体のネットワーク化を進めるためには、ライセンスバンドとアンライセンスバンドのそれぞれを用途によって使い分けるとともに、高信頼・低遅延化技術の適用が必要である。

本稿では、高信頼・低遅延な無線技術として、ライセンスバンド向けのリニアセル構築技術と、アンライセンスバンド向けの耐干渉無線技術について述べる。

(注1) Bluetoothは、Bluetooth SIG, Inc. の登録商標である。
 (注2) ZigBeeは、ZigBee Alliance, Inc. の登録商標である。
 (注3) Wi-SUNは、Wi-SUN Allianceの登録商標である。

2. ライセンスバンドにおける高信頼・低遅延化

2.1 ミリ波リニアセルコンセプト

ライセンスバンドを用いた専用無線通信システムの1つ

である列車無線では、従来の音声通話サービスに加え、列車各部の機器状態のリアルタイムモニタリングやセキュリティを目的とした監視映像の伝送などの新たなアプリケーションも期待されており、列車無線システムの更なる大容量化、高信頼化への対応を進める必要がある。

大容量化に向けた三菱電機の取組みの一例であるミリ波リニアセルコンセプトを図1に示す⁽¹⁾。ミリ波帯はマイクロ波帯に比べて、①伝搬減衰が大きい、②直進性が高いという特徴があるが、伝搬減衰に対してはアンテナの指向性利得によって補填することが可能であるため、ミリ波が持つ直進性の高さを活用した、高速道路や鉄道等の高速移動体向けのミリ波通信システムを検討している。

アンテナごとに基地局を設置する従来のシステム構成では、干渉を避けるため短い距離で周波数の分割・切替えが必要であり、高速伝送が難しいという問題があった。また、基地局数が多くなることで、コストが増大するとともに、接続先の基地局を切り替えるハンドオーバーの回数が多くなる問題があった。これに対し、当社では多数の路側アンテナを1つの基地局に接続し、仮想的に大きなリニアセルを構成する。これによって、基地局間の距離が大きく取れるため、周波数の再利用が可能となり、2周波数繰り返して全線のサービスが実現できる。このため、基地局数の削減とともに、基地局当たりの周波数帯域幅を広くとることができ、高速伝送が可能となる。しかし、一方で、セル内及び近隣セル間における電波干渉問題への対策が必要である。次に、当社の対策技術を述べる⁽²⁾。

2.2 セル内干渉対策

セルサイズを大きくしたりニアセルでは、同一セル内の路側アンテナから放射される信号に起因した長遅延波によってセル内干渉が発生する(図2の対策前)。このセル内干渉の影響をなくすために十分に長いガード区間を用意することも可能であるが、トレードオフとしてシステムスループットの低下を招くこととなる。

そこで、このセル内干渉対策として、各路側アンテナで敷設条件から決定される固定の送信遅延を与えることで、

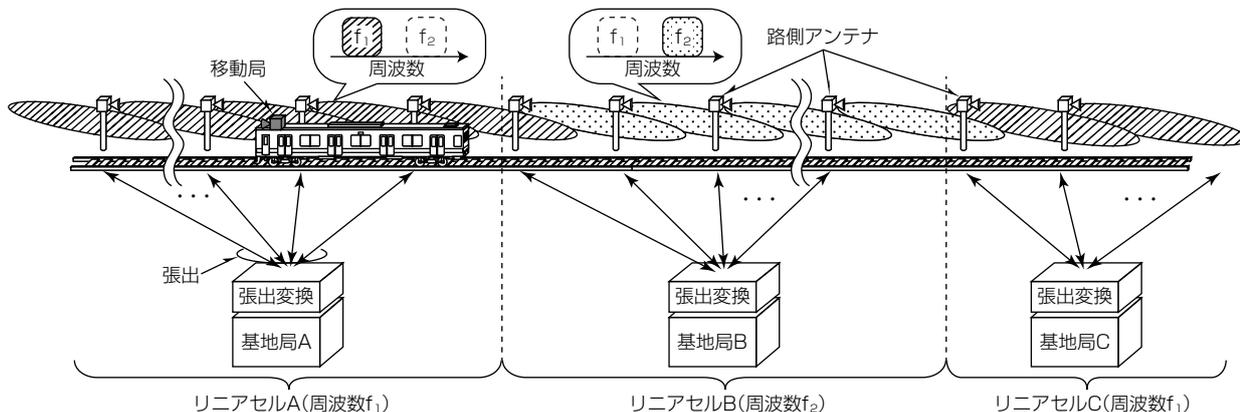


図1. ミリ波リニアセルコンセプト

移動局が信号を受信するタイミングを一定時間内に収める対策(図2の対策後)を検討している。これによって、符号間干渉用のガード区間を短縮することができる。

2.3 近隣セル間干渉対策

2周波繰り返しでは、同一周波数を用いる近隣セル間でセル間干渉が生じる。これは、特に伝搬減衰の小さくなる晴天環境で顕著であり、セル端近傍のアンテナほどセル間干渉の影響は大きくなる。

この問題を解決するため、各路側アンテナにおける送信電力制御の適用を検討している。具体的には、路側アンテナが一方向に指向性を形成することを利用し、各アンテナの送信電力を傾斜配分する(図3)。

路側アンテナによって形成される受信電界は、自セルでは所望信号レベル、近傍セルでは干渉信号レベルとなる。受信点での信号品質を確保するため、①近傍セルからの被干渉が大きい地点におけるアンテナの送信電力を大きくし、②近傍セルへの与干渉が大きいアンテナの送信電力を小さくするように電力配分する。また、降雨環境で、雑音レベルを考慮したSINR(Signal-to-Interference-plus-Noise power Ratio)が要求レベルに満たない場合は、その分の送信電力も調整する。

2.4 セル内/セル間干渉軽減効果

セル内干渉対策と近隣セル間干渉対策の効果を、アンテナ設置間隔を1,000m、セルサイズを10,000m、アンテナ利得を32.3dBiとしたモデルによって計算機シミュレー

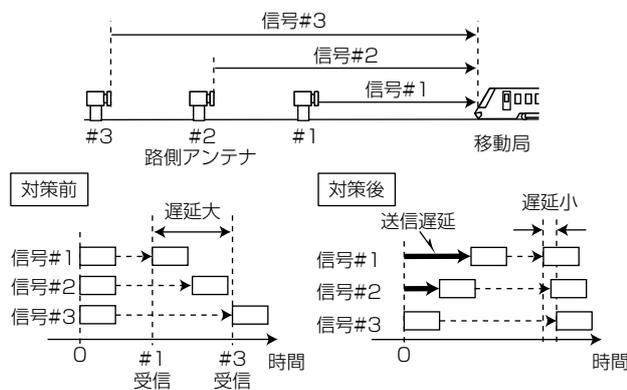


図2. セル内干渉対策

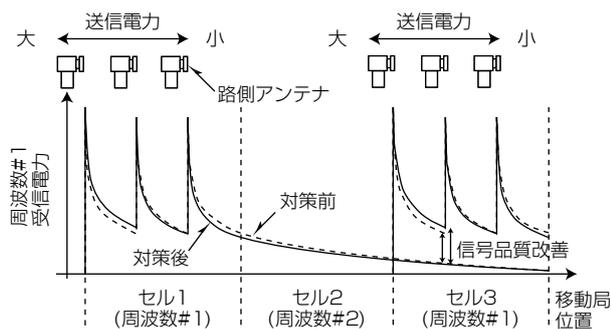


図3. セル間干渉対策

ションで評価した。

対策を行わない場合、セル内干渉対策のみ、セル内及びセル間干渉対策を適用した場合について、晴天環境における通信距離ごとの無線フレーム到達率特性を図4に示す。対策を行わない場合、通信距離が長くなるにつれて、符号間干渉が大きくなるため、無線フレーム到達率が低くなっているのが分かる。これに対し、セル内及びセル間干渉対策実施時は、全セル内で無線フレーム到達率ほぼ100%を達成できることが分かる。

3. アンライセンスバンドにおける高信頼・低遅延化

無線LANを始めとするアンライセンスバンドは、一定の基準を満たすことで自由に使うことができるため、無線機器が互いに電波干渉源となり、通信が途切れることが多かった。このため、リアルタイム性や信頼性が求められる産業機器の接続には無線LANを始めとする汎用的な無線通信は利用されることが少なかった。例えば、無線LANでは、自局がデータを送信する際に、周囲の電波環境を測定し、他局が通信を行っていないタイミングで送信するキャリアセンスと呼ばれる機能がある。狭い範囲で多くの無線LANを利用する場合、キャリアセンスによって大きな伝送遅延が発生してしまう。

この章では、アンライセンスバンドで高信頼・低遅延を実現するための耐干渉無線技術として、図5に示す周波数ホッピングによる衝突回避である干渉回避と干渉量に応じた合成である干渉抑圧について述べる。

3.1 周波数ホッピングによる衝突回避(干渉回避)

干渉回避は、使用する帯域(チャネル)を時間ごとに切り替え、単位時間当たりのスペクトルを拡散する手法で、同一周波数を利用し続ける方式と比べて雑音耐性を向上させることが可能である⁽³⁾。

一例として、帯域幅1MHz、1msの packets を50msごとに周波数ホッピングを行う通信方式について検証し、実環境で取得したスペクトログラムと重ね合わせたものを

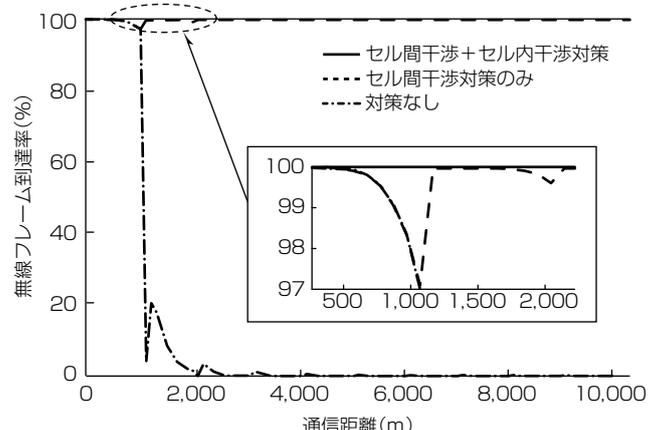


図4. 無線フレーム到達率特性

図6に示す。

周波数ホッピングを5回行い、5回とも-90dBm以上の干渉レベルを検知した場合を伝送不良と定義し、ホッピングを行わないシステムとパケット衝突確率解析によって比較した結果を表1に示す。

この結果から、干渉回避によって伝送成功確率が約82.3%向上し、干渉回避の有効性が確認できる。

3.2 干渉量に応じた合成(干渉抑圧)

干渉抑圧は、地上デジタル放送や無線LANなどで採用される変調方式であるOFDM(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)をベースとし、データを重畳しないヌルシンボルを時間-周波数に分散配置し、受信側でこのヌルシンボルによって干渉量を測定し、干渉量に応じ

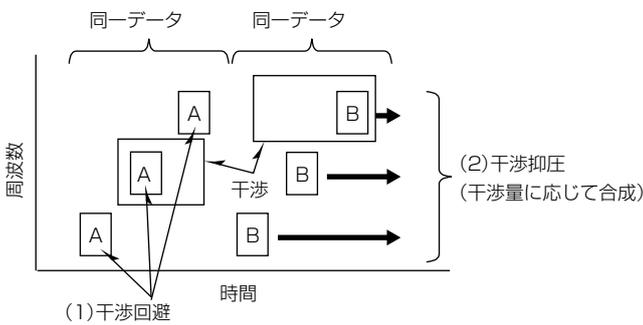


図5. アンライセンスバンド向け耐干渉無線技術

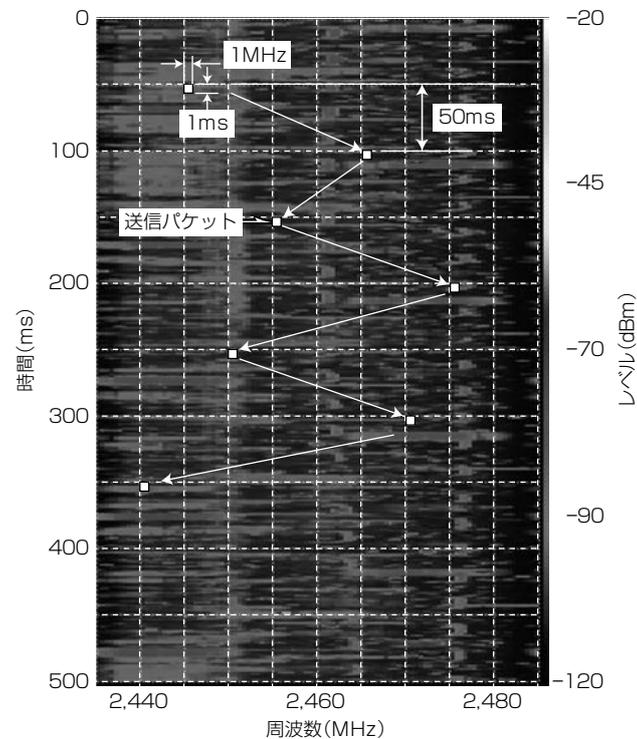


図6. 周波数ホッピングのシミュレーション例

表1. パケット衝突確率解析

通信方式	衝突確率(%)
常に同じ帯域を利用するシステム	0.130
干渉回避	0.023

てデータの重み付けを行うことによって干渉を抑圧する⁽⁴⁾。データを重畳しないヌルシンボルを配置することによって、自システムの信号と比較して高いレベルの干渉や、ダイナミックレンジの広い干渉に対して、精度の高い干渉量の測定が可能となる。また、ヌルシンボルを分散配置することによって、自システムの送信信号中のどこに衝突するか分からない短時間干渉や狭帯域干渉に対して、その存在を認識し、適切に対応することが可能になる。

3.2.1 ヌルシンボルの分散配置

一例として、4 OFDMシンボルに1つの割合で、データを重畳しないヌルシンボルを配置したイメージを図7に示す。ヌルシンボルの挿入量や挿入間隔は、自信号の帯域やシンボルレートと干渉の帯域や時間長との関係や、要求される伝送レートなどに応じて適切な値が決まる。ヌルシンボルの挿入位置は、受信側であらかじめ既知とする。サブキャリアへのデータのマッピング後、データ変調処理を行う。

3.2.2 干渉量の測定と重み付け

図8に干渉量の測定のイメージを示す。まず、着目しているデータシンボル(図8における黒塗りのシンボル)を含む4×4の領域内にある4つのヌルシンボルの平均電力を測定する。同様に、その周りの8つの4×4の領域のそれ

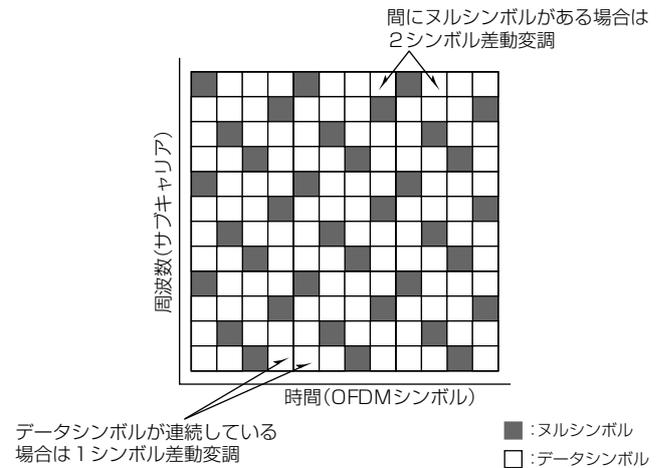


図7. ヌルシンボル配置のイメージ

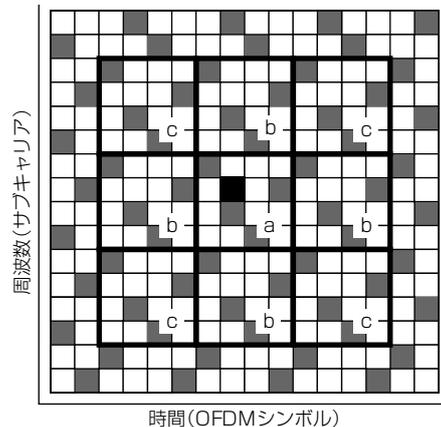


図8. 干渉量の測定

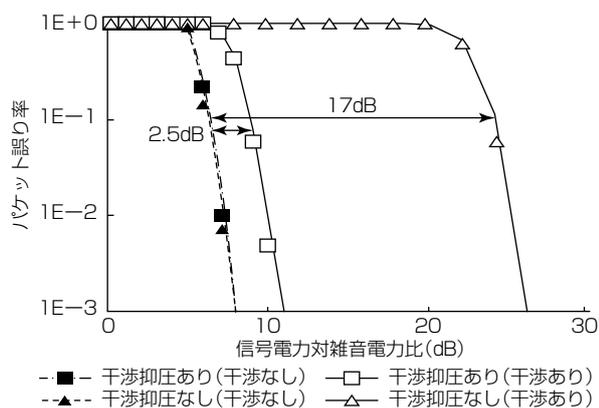


図9. パケット誤り率特性

表2. 干渉条件

項目	値
印加サブキャリア	1
干渉電力	雑音電力+28dB(干渉が衝突したサブキャリアでの電力)
印加時間	全OFDMシンボル

それぞれについて、ヌルシンボルの平均電力を測定する。そして、9つの4×4領域の干渉電力を図中のa, b, cの重み付けで加算することによって、時間-周波数の二次元フィルタを通した、このデータシンボルに対する干渉電力を算出する。

干渉量測定後、干渉量でデータシンボルの重み付けを行いながら、遅延検波を行う。干渉量による重み付けによって、例えば、大きな干渉が衝突したシンボルのデータは値が小さくなり、データの信頼度が低くなる。

3.2.3 干渉抑圧による効果

図9に、干渉量による重み付けを行う場合(干渉抑圧あり)と行わない場合(干渉抑圧なし)のそれぞれについて、表2の条件の干渉を加えた場合と加えない場合の1ビット当たりの信号電力対雑音電力比(E_b/N_0)に対するパケット誤り率(Packet Error Rate: PER)を示す。干渉抑圧なしの場合は、干渉を加えないときと比べ、干渉を加えたときは、PERが 10^{-1} を満たす E_b/N_0 で、特性が17dBと大きく劣化している。一方、干渉抑圧ありの場合は、干渉が多いデータシンボルの信頼度は低く、干渉が少ないデータシンボルの信頼度は高くなるようにデータシンボルの重み付けが行われるため、誤り訂正が効果的に働く。そのため、干渉を加えたときでも、加えないときと比べ、PERが 10^{-1} を満たす E_b/N_0 で、約2.5dBの特性の劣化に抑制できている。干渉抑圧なしの場合と比較すると14.5dBの差であり、この差は通信距離に換算すると、5倍以上の拡大に相当する。

4. 社会インフラ監視への適用

国内における道路・橋・トンネル・鉄道などの社会インフラは、高度経済成長期に集中して整備されたものが多く、近年、これらの老朽化が問題となっている。

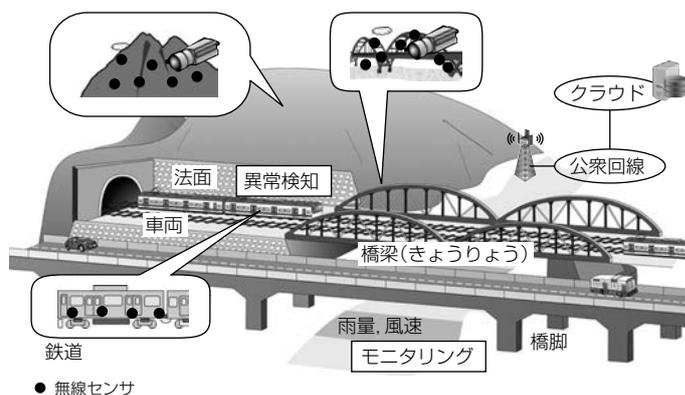


図10. 社会インフラ監視への適用

このため、これら社会インフラの点検・診断にセンサと無線通信を用いて予防保全や迅速な復旧活動を行う社会インフラ監視システムが期待されている(図10)。また、崖崩れや洪水などの自然災害はリアルタイムに検知する必要もある。例えば、多数の無線センサからデータサイズの小さな測定情報を収集する用途には、設置の自由度が高いアンライセンスバンドを活用し、一時収集拠点と監視拠点の間のような長距離伝送や高速移動環境、監視映像の伝送などの大容量通信の用途には、ミリ波のようなライセンスバンドを活用することが考えられる。ライセンスバンドとアンライセンスバンドを用途に応じて使い分け、それぞれに対して高信頼・低遅延な無線通信技術を適用した社会インフラ監視システムを構築することで、安心・安全な社会の実現に貢献していく。

5. むすび

IoT時代に向けて高信頼・低遅延を実現する無線通信技術について述べた。今後、これらの技術の移動通信環境への適用のほか、道路や鉄道、ビルや工場、橋などの社会インフラの監視への適用も視野に入れ、技術の展開を進めていく。

参考文献

- (1) Nishimoto H., et al.: Millimeter-wave train radio communication system based on linear cell concept, Proc. of STECH2015, 1~12 (2015)
- (2) Umeda S., et al.: Cell structure for high-speed land-mobile communications, Proc. IEEE VTC2015-Fall, 1~5 (2015)
- (3) 小篠大輔, ほか: 電波環境測定データを用いたオフライン検証による高信頼無線方式の検討手法, 電子情報通信学会技術研究報告, DC2013-76 (2013)
- (4) 鈴木和雅, ほか: 耐干渉無線通信方式に関する検討, 電子情報通信学会技術研究報告, WBS2014-53 (2014)