

Cyber-Physical システムを実現する 無線ネットワーク高信頼化運用技術

Operation Technology for Highly Reliable Wireless Networks to Realize Cyber-Physical Systems

藤田 裕志 新井 宏明 横尾 郁 菊月 達也 濱湊 真 二宮 照尚

あらまし

デジタル革新に伴い、企業、個人、ビジネス、システムなどがデータを介して有機的につながることが期待されている。これらを実現するためには、人やモノが存在するフィジカル（現実）空間と処理を行うサイバー（仮想）空間を安定して接続するCPS（Cyber-Physical System）の実現が鍵となる。特に人、モノ、ロボット、車など、動きがあるものをサイバー空間につなぐためには、無線技術の活用が必要である。無線技術は日々進化・多様化し、利便性が向上している。一方、実現したいアプリケーションに合わせて十分な性能を引き出すためには、無線の専門知識が求められる。富士通研究所では、高度な専門知識を持っていない無線ネットワーク管理者であっても、容易に無線ネットワークの設計・構築・運用が可能な技術の開発を行ってきた。

本稿では、無線ネットワークの設計・構築・運用などの各フェーズを誰もが容易に実行可能にする、自動設計技術、干渉対策技術、および運用自律化への取り組みについて述べる。

Abstract

With digital innovation, companies, individuals, businesses, systems, and so on are expected to connect organically through data. Realizing cyber-physical systems (CPS)—which create stable connections between physical (real) spaces (where people and things exist) and virtual (cyber) spaces (used for processing)—will be key to realizing these connections. In particular, connecting mobile entities such as people, things, robots, and cars to cyberspace requires the utilization of wireless technology. Evolving and diversifying on a daily basis, wireless technology is improving in terms of convenience. At the same time, expertise in wireless technology is needed to obtain sufficient performance in accordance with the application to be realized. Fujitsu Laboratories has been developing technology that allows even those wireless network administrators without advanced expertise to easily design, construct, and operate wireless networks. This paper describes automatic design technology, interference control technology, and our approach to autonomous operation, which provide anyone with the ability to easily execute each phase of the design, construction, and operation of wireless networks.

1. まえがき

デジタル時代を迎えた今、企業、個人、ビジネス、システムなどがデータを介して有機的につながり、イノベーションが創造され、豊かな社会が実現されることが期待されている。政府が第5期科学技術基本計画で提唱したSociety 5.0では、人やモノが存在するフィジカル空間（現実空間）からの膨大な情報をサイバー空間（仮想空間）でAI（人工知能）が解析し、フィジカル空間にフィードバックする姿（CPS：Cyber Physical System）が描かれている。そして、このCPSによって産業や社会にこれまでにない新たな価値を生み出すことが提唱されている。⁽¹⁾ 今後、フィジカル空間とサイバー空間を適切につなげることが重要になると考えられる。CPSを実現していくためには、つながる無線ネットワークを手軽に構築・運用できる技術が重要となる。

無線ネットワークを新たに構築・運用する場合、全てのアプリケーション要件を満たすように、無線規格の選定、基地局の配置、チャンネルの設定などを行わなければならない。それらは専門知識や経験を要するため、現状は専門家のノウハウと試行錯誤に頼っており、CPS実現を妨げる要因の一つとなっている。

そこで富士通研究所では、高度な専門知識を持っていない無線ネットワーク管理者であっても、容易に無線ネットワークの構築・運用および運用自律化が可能な技術を開発してきた。

本稿では、構築に関しては自動設計技術を、運用に関しては干渉対策技術を、更に運用自律化に関しては電波解析技術と標準化への取り組みを述べる。

2. 無線ネットワークの現状と課題

この章では、無線ネットワークの現状と、CPS実現に向けた課題について述べる。

2.1 無線ネットワークの現状

人やモノが実際に存在するフィジカル空間は、多種多様である。このため、収集およびフィードバッ

クされるデータを送受するネットワークは、それぞれの用途に合わせて設計する必要がある。

例えば工場では、生産設備の制御・監視のためのネットワーク、作業管理のためのネットワーク、および事務作業系のネットワークが並存している。⁽²⁾ また、自動化の進展に伴い、監視カメラや製造用ロボット、無人搬送車などが新たにCPSに取り込まれていくと考えられる。このうち、製造用ロボットにはリアルタイムで確実な通信が、監視カメラには広帯域で連続した通信が必要とされる。

また医療現場では、患者の容態の急変を告げるアラームの場合、データ量は少ないが遅延や不達が許されない。病棟から医者の指示を仰ぐための構内VoIP（Voice over Internet Protocol）通話では、聞き間違いが生じないように音声の品質を保つ必要がある。一方で、医師や看護師が手元で参照する電子カルテシステムでは、滑らかにレスポンスよく大容量の診断画像データを送受信する必要がある。

一方教育の現場では、データを基礎とした学校・学級経営の変革（スマートスクール）が進められている。⁽³⁾ 例えば、デジタル教材の大量データを50人の生徒に対して同時に配信するためには、大容量の無線ネットワークが必要となる。

更には、活動する人や移動するモノとの通信、あるいは工場や店舗などレイアウトの変更がたびたび行われる場所での通信には、無線ネットワークが適している。

2.2 無線ネットワークの課題

一般的に、利用する周波数帯が高くなるほど、一度に送信可能なデータ量（データレート）は大きくなるが、通信距離が小さくなる。例えば、5G（第5世代移動通信システム）で10 Gbpsの超高速通信が期待されるミリ波は、28 GHz帯という高い周波数帯を用いるため、通信距離は数十m規模となる。更に、実環境では遮蔽や反射により通信距離は大きく変動する。一方、LPWA（Low Power Wide Area）⁽⁴⁾ の代表であるSigFoxは、5Gの約30分の1の920 MHz帯を利用しており、伝送レートは100 bpsと低速であるが、通信距離はkm単位と広範囲に及ぶ。また、複数の無線ネットワークが同じ場所に構築されると、それらの間での電波干渉が問

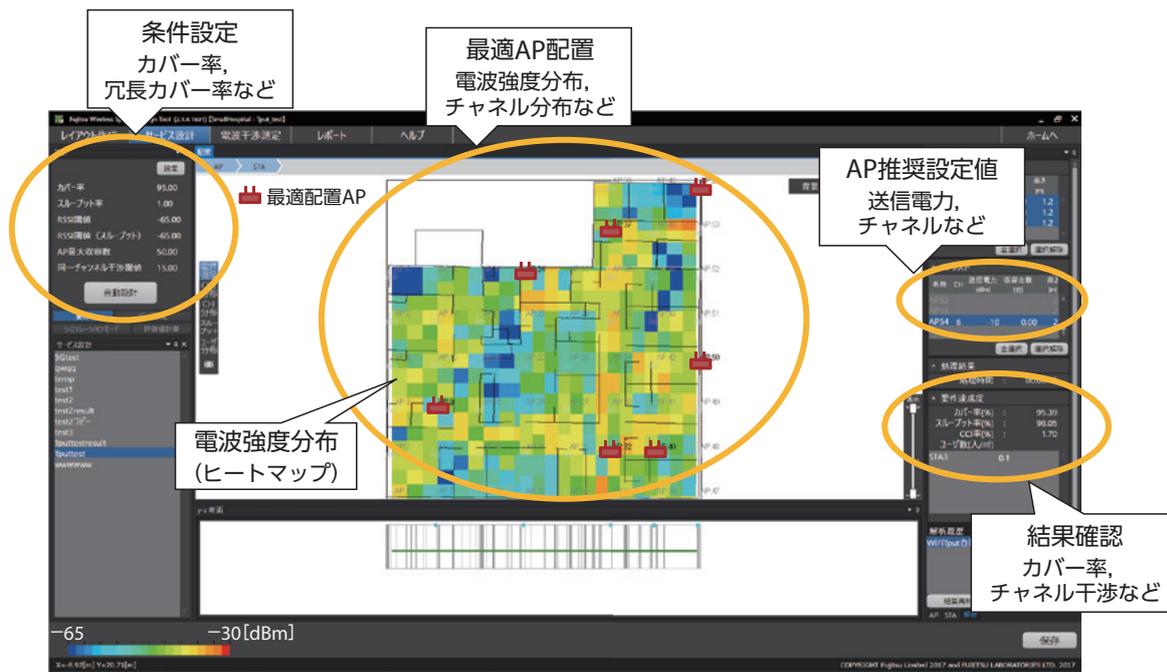


図-1 自動設計ツール画面表示例

題となる。そのため、電波状況の調査に基づいて、適切なチャンネル・送信電力の設定、無線機の配置調整などが必要になる。

利用されている電波の調査、あるいは構築・運用を補助するサービスや技術は、既にいくつか提供され始めている^{(5), (6)}。しかし、これらのサービスであっても、障害の根本原因の分析や効果的な対策の選定には膨大な工数がかかる上に、それに対応できる専門家が少なかった。

そこで富士通研究所では、高度な専門知識を持っていない無線ネットワーク管理者であっても、容易に無線ネットワークを構築・運用できる技術を開発してきた。次章以降では、構築に関しては自動設計技術を、運用に関しては干渉対策技術を紹介する。更に、運用自律化に向けた電波解析技術と標準化への取り組みについても紹介する。

3. 無線ネットワーク自動設計技術

本章では、アプリケーション要件に適合した無線ネットワークの自動設計を行う技術を紹介する。ここで紹介するのは、無線LANを用い、途切れることのないモバイルストリーム通信を実現する設計技

術である。この技術は誰でも使える自動設計ツールとして具現化した。

まず、簡易描画機能を用いて、建屋レイアウトとAP（アクセスポイント）の設置候補位置を入力する。その後、ツールが要件を満たすAPの設置位置を選択し、チャンネルと送信電力の推奨設定値を自動出力する（図-1）。この推奨設定値は、ストリームが途切れないように、端末が常に複数のAPに接続できるような配置・設定となっている。このAP設置位置の設計には、従来は計算能力の高い計算機を必要としたが、市販されているノートPC^(注)でも動作可能な二つの技術を開発した。

一つは、電波シミュレーション技術である。ここでは、電波を光として扱うイメージング法であるレイトレーシングを用いた。この方式は、建屋内などの反射・回折が複雑な環境であっても計算精度が高い一方で、計算時間が長いことが難点である。特に、構造物が多い場合や繰り返し計算が必要な場合には、計算能力の高いワークステーションであっても数時間かかる場合がある。そこで、不要な電波経路の計算を省略する独自技術を開発し、市販シミュ

(注) CPU : Core i5-6300U 2.4 GHz, RAM : 12 GB

レータの5倍以上の高速化を実現した。

もう一つは、高速AP配置技術である。仮配置したAPの個数を順次増加または減少させ、電波シミュレーションによって性能を確認しながら、所定の要件を満たすAPの設置位置、送信電力、チャンネルのセットを探索して最小AP台数を求める。その際、候補となる組み合わせの数は膨大であり、総当たり探索では数日を要してしまう。そこで、非線形な評価関数について離散値の最適解を高速に探索可能な方法である、遺伝的アルゴリズムを利用した。遺伝的アルゴリズムのパラメーターである「個体」は、各AP位置、チャンネル、送信電力の情報（遺伝子）の組み合わせとした。また、評価関数として部屋の各位置で接続可能なAPの数（冗長度）などを定義した。

これら二つの技術によって、ホテルや病院など小部屋が多く設計が難しい環境下において市販ノートPCを使用し設計した場合でも、AP候補数を31個から13個に絞るまでにかかる時間は5分以下と良好な結果を得た。

ここでは、モバイルストリーム通信への適用例について紹介したが、要件を評価関数としてモデル化することによって、ほかのアプリケーションにも活用可能である。

4. 干渉対策技術

本章では、無線ネットワークの運用時に課題となる電波干渉を、自動で診断・回避する技術を紹介する。

4.1 干渉診断技術

富士通研究所はこれまでに、AP送信に対する端末の物理層での応答時間を測定することで、干渉診断を行うアルゴリズムを提案している。⁽⁷⁾しかし、チップレベルでの実装が必要となるため、実用化には至らなかった。今回は、各端末からの受信電波強度（受信電力）と通信データレート（以下、通信レート）という、既存のAPで取得可能な二つの情報を組み合わせて診断する手法を開発した。

無線LANでは、通信誤りが発生した場合は通信レートを下げて通信を行う。そのため、一般的に受信電力が小さい場合は通信レートが低く、大きい場合は通信レートが高くなる。一方、干渉が発生した場合には、受信電力が大きくても通信レートは低くなる。この性質を利用して、受信電力と通信レートとの関係をあらかじめ取得しておき、接続切断直前の受信電力と通信レートから干渉影響の有無の判定を行うこととした（図-2）。電波暗室内での40台のタブレット端末を使った実験では、信号発生装置から意図的に与えた干渉を正しく検出した割合は、2.4 GHz帯で75%、5 GHz帯で90%であり、実用上良好な結果を得た。

4.2 干渉回避技術

富士通研究所は、無線LANの各APに適切なチャンネルを自動で割り当てることで、単一ネットワーク内での電波干渉を回避する技術を既に開発している。^{(7), (8)}この方式では、AP間の干渉電波の強度を基にチャンネルを割り当てていた。他社製品も同様に電波強度を基に判断しているが、既設の他システム

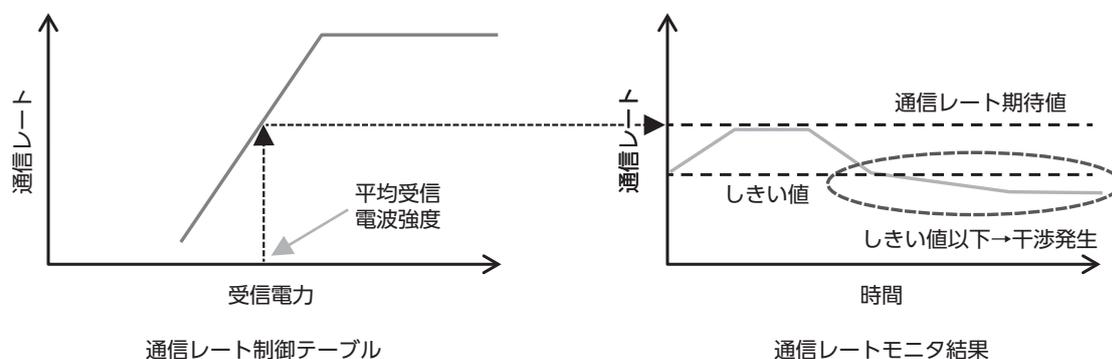


図-2 干渉診断技術

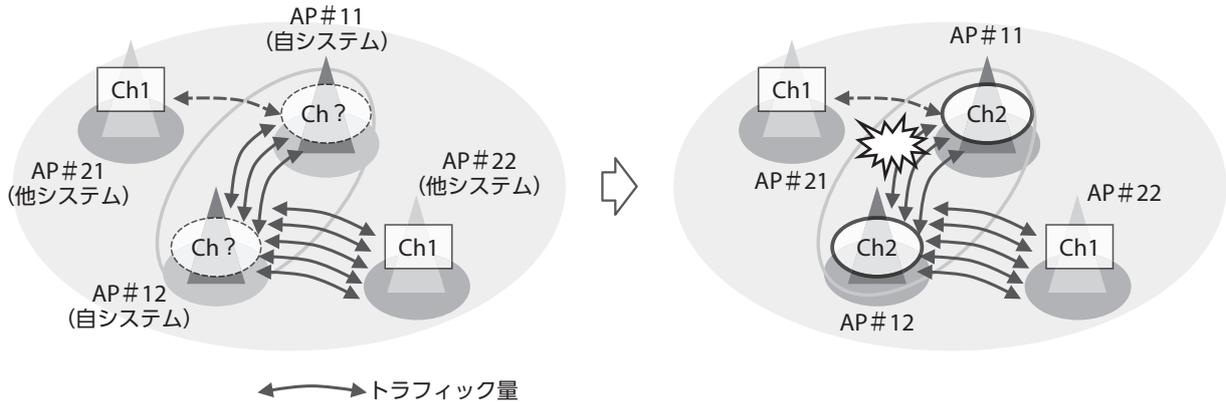


図-3 従来技術によるチャンネル割り当て（電波強度基準）

が存在する場合には、図-3に示すように、かえって干渉の影響を受けるケースがあった。この問題を解決するために、複数の無線ネットワークが混在し、利用可能なチャンネル数に制限がある複雑な条件であっても、干渉を回避できる技術を開発した。

本技術では、まず従来方式を用いて自システム内の干渉要因となるトラフィック量（以下、干渉量）を最小化するチャンネルの割り当てを行う。その後、自他両システムによって無線が使用される時間率（無線占有率）を測定し、干渉量が最小となるようなチャンネルの組み合わせを探索する（図-4）。探索には、以前開発した高速探索アルゴリズムを流用した。^{(8), (9)}

この手法では、干渉量の大きなAPから順に候補チャンネル数を分岐しながら、チャンネルの組み合わせ候補（ツリー）を作成する。APを順次ツリーに加える際には、組み合わせ候補をシステム干渉量が小さいものみに絞り込むことで、探索を大幅に高速化している。

また、各APがチャンネルを切り替えながら無線占有率を測定する際に長期間通信を中断する必要があるが、これを回避する方式も開発した。この方式では、全APが利用中のチャンネルの無線占有率と周辺APからの受信電力を共有し、他チャンネルの干渉量をそれらのデータから推定するようにした。

本技術によるチャンネル割り当ての結果を、計算機シミュレーションで確認した。干渉によるスループット低下の影響が顕著になるように、自システムAPと他システムAPそれぞれ9台をほぼオーバ-

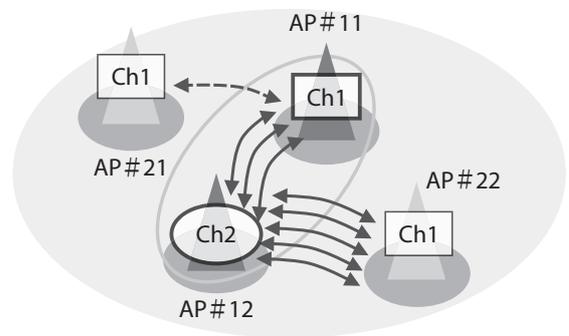


図-4 提案技術によるチャンネル割り当て（トラフィック量基準）

ラップさせて配置し、候補チャンネル数を三つとした。この条件で計算したところ、スループットがランダム配置に比べて平均50%、従来方式に比べて20%改善することを確認した。

5. 運用の自律化に向けた取り組み

本章では、管理者が電波調査や干渉調停に労力を費やすことなく、自動的に解決することを目指した技術開発と標準化活動への取り組みを紹介する。

5.1 空間電波解析技術

一般に、電波の不達や干渉などの無線ネットワークで起こる障害は、端末やAPが利用される場所にひも付けられていることが多い。什器や生産設備などの設置による局所的な電波の遮蔽^{じゆうき}、あるいは管理外の持ち込み端末による干渉など、無線ネットワー

ク構築時に想定していなかった障害が発生した場合には、現地調査によって障害の発生場所を特定する必要があります。

そこで、図-5に示すように、電波取得用の端末（電波プローブ）を観測対象のエリア内に複数設置しサーバで解析することで、電波調査を自動化する技術を開発した。電波プローブとは、観測対象エリアの詳細な電波情報を取得する装置である。解析用サーバでは、電波プローブが取得した粒度の高い電波情報を統合分析することで、観測対象エリアの端

末分布やトラフィック分布などを推定し、障害検知、原因推定、発生位置特定を行う。更に、3章で述べた電波シミュレーション技術を用いて、障害物の除去、AP配置の変更などの対策案を実施した場合の効果を推定する。

解析結果を表示した画面の例を図-6に示す。この例では、部屋の左側半分でスループットが低下していることが示されており、その原因として障害物による遮蔽が示されている。また、二つの対策案が効果の指標値とともに示されている。無線ネットワー

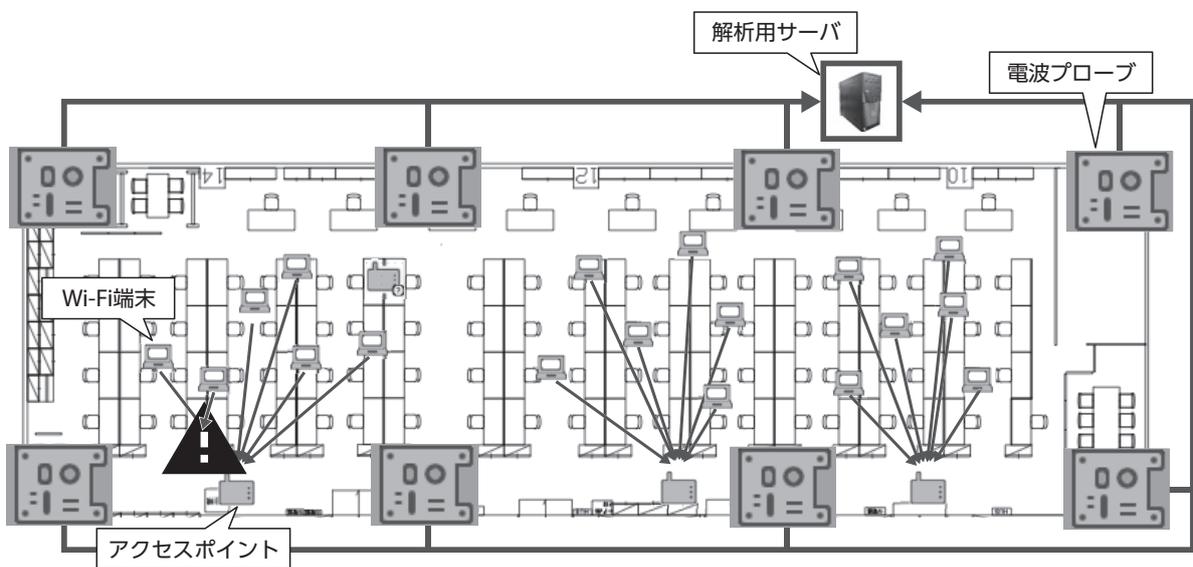


図-5 空間電波解析技術のシステム構成例

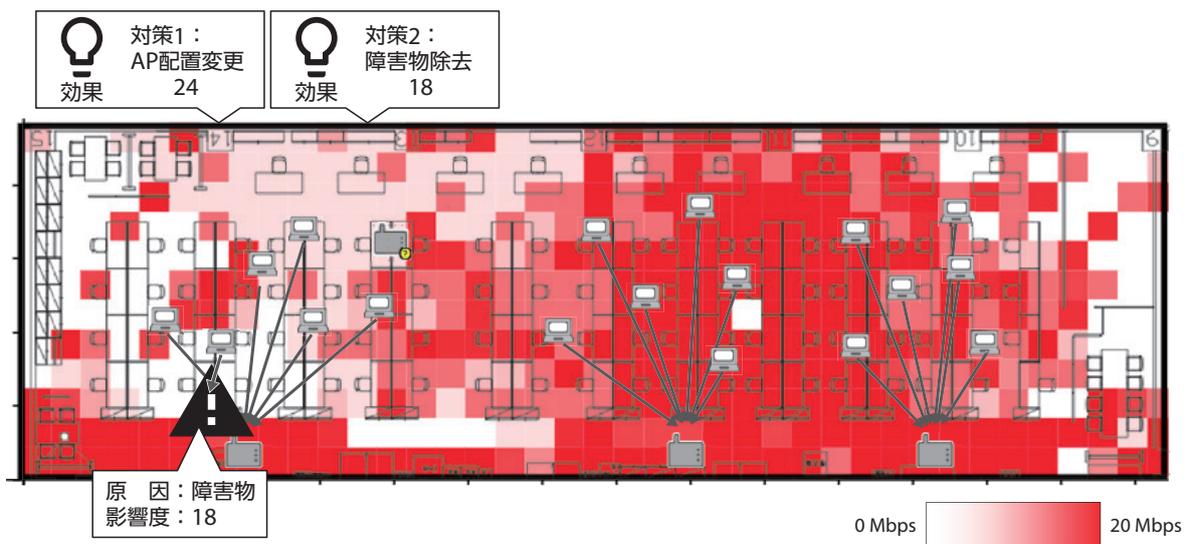


図-6 空間電波解析技術の解析画面の例

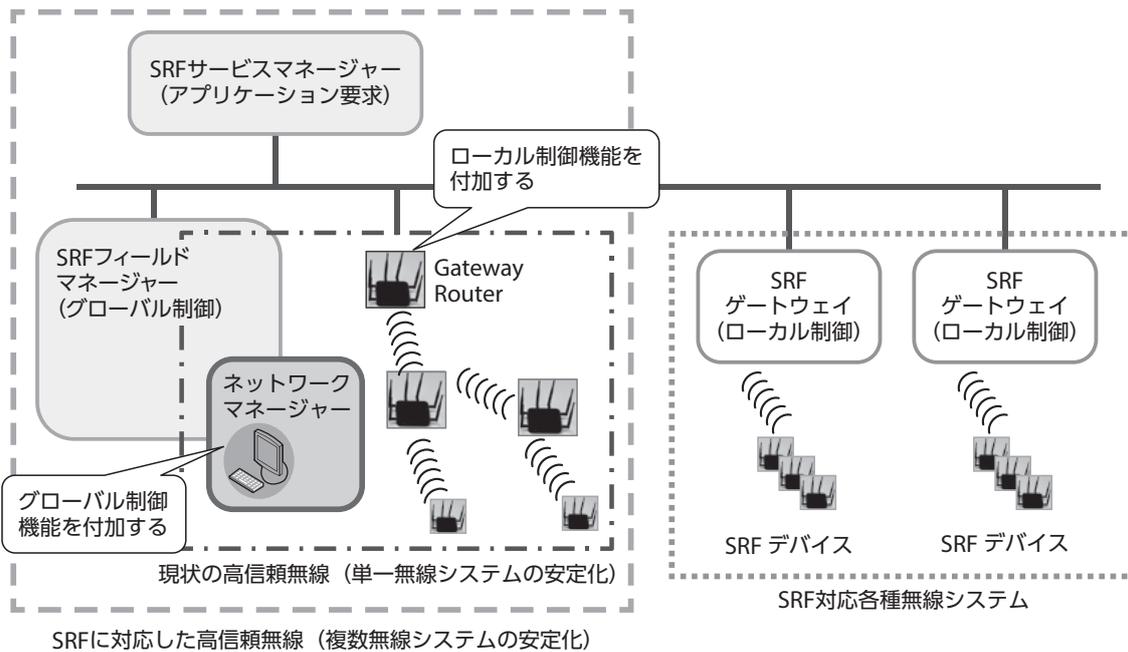


図-7 SRF無線プラットフォームによる複数無線ネットワークの安定化

ク管理者は、例えば効果の一番大きい対策1によるAP配置変更が難しい場合は、対策2の障害物除去を試すなど、適宜取り得る対策を選択して実施できる。

5.2 製造現場での無線ネットワーク安定化を目指した標準化への取り組み

製造現場では、品質管理、環境管理、作業支援、機器制御、安全管理など、それぞれ通信要件が異なる様々なアプリケーションが混在して運用されている。これらのアプリケーションは、電波干渉を考慮せず、個々の設備や工程ごとに段階的に追加運用されてきた。そのため、無線区間でお互いに干渉し、通信要件が満たされないという問題が起り始めている。⁽¹⁰⁾

このような複数の無線システムが混在する環境であっても、安定した無線通信を実現し、製造現場のICT化を促進するために、オムロン、ATR、サンリツオートメーション、NICT（情報通信研究機構）、日本電気、村田機械、富士通によってFFPA（Flexible Factory Partner Alliance）が結成された。⁽¹¹⁾ 主な活動として、SRF（Smart Resource Flow）無線プラットフォームの仕様策定、およびその普及活動を行っている。

FFPAで仕様を策定しているSRF無線プラットフォームは、無線リソース（周波数、時間、空間）を協調制御することによって自律的な安定化を目指すものである。SRF無線プラットフォームは、グローバル制御機能とローカル制御機能とのハイブリッド方式を採用している。グローバル制御機能は、全体の無線環境とアプリケーション要件を考慮して各無線システムに制御ポリシーを通知するものであり、無線ネットワークを管理するSRFフィールドマネージャーが行う（図-7）。⁽¹²⁾ ローカル制御機能は、SRFゲートウェイによって実現され、前述の制御ポリシーの範囲内で自律的に無線環境の局所的变化に対応するものである。

富士通は、製造現場の単一无線ネットワークのつながりやすさを追求した高信頼無線ソリューション⁽²⁾を開発している。FFPAに参画して標準化活動を行いながら、SRF機能を取り入れることで、複数の無線システムが混在する環境での安定稼働を目指す。

6. むすび

本稿では、CPSを実現する無線ネットワーク高信

頼化運用技術として、自動設計技術、干渉対策技術、および運用自律化に向けた取り組みについて紹介した。これらの技術は、高度な専門知識を持っていない無線ネットワーク管理者であっても、信頼性の高い無線ネットワークの構築および安定運用を可能とする。

5Gなど最新の無線技術が利用可能になりCPSの普及が期待される一方で、構築・運用におけるトラブルの増大が予想される。富士通研究所は、トラブルを未然に自律的に防止する無線ネットワークなど、今後も誰もが簡単にCPSの恩恵を享受できる技術の開発を推進していく。

本稿に掲載されている会社名・製品名は、各社所有の商標もしくは登録商標を含みます。

参考文献

- (1) 内閣府：Society 5.0.
https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html
- (2) 蛭田盛夫ほか：スマートファクトリーの実現を支える無線ネットワーク. FUJITSU, Vol.69, No.6, p.22-29 (2018).
<https://www.fujitsu.com/jp/documents/about/resources/publications/magazine/backnumber/vol69-6/paper04.pdf>
- (3) 文部科学省：学校におけるICT環境の整備について（教育のICT化に向けた環境整備5か年計画（2018（平成30）～2022年度））.
http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/zyouhou/detail/1402835.htm
- (4) 総務省：LPWAに関する無線システムの動向について.
http://www.soumu.go.jp/main_content/000543715.pdf
- (5) iBwave Solutions Inc.：iBwave.
<http://www.ibwave.com/>
- (6) Mist Systems社：Wi-Fi with Assurance.
<https://www.mist.com/wi-fi-assurance/>
- (7) 藤田裕志ほか：無線LANの遠隔障害診断技術. FUJITSU, Vol.66, No.5, p.46-52 (2015).
<http://img.jp.fujitsu.com/downloads/jp/jmag/vol66-5/paper07.pdf>
- (8) 富士通：無線LANの電波干渉を即座に解消する自動

チャンネル割当技術を開発。

<https://pr.fujitsu.com/jp/news/2015/09/9-1.html>

- (9) 中山ほか：無線LANシステムにおける低演算量チャンネル割り当てアルゴリズムの提案. 電子情報通信学会, ソサイエティ大会, B-19-7 (2015).
- (10) 江連ほか：製造現場における多種無線通信. 信学技報, RCS2017-379, p.327-331 (2018).
- (11) FFPA.
<https://www.ffp-a.org/jp-index.html>
- (12) FFPA：ホワイトペーパー 製造現場のデジタル化 無線通信から始まる「産業革命」. (2019).
https://ffp-a.org/document/files/190320_FFPA-WP_J.pdf

著者紹介



藤田 裕志 (ふじた ひろし)

(株) 富士通研究所
サービスビジネス開発運用・ユニット
デジタルサービスシステムの運用管理
技術の研究開発に従事。



新井 宏明 (あらい ひろあき)

(株) 富士通研究所
サービスビジネス開発運用・ユニット
デジタルサービスシステムの運用管理
技術の研究開発に従事。



横尾 郁 (よこお かおる)

(株) 富士通研究所
ICTシステム研究所
次世代無線システムを活用したソ
リユーション向け基盤技術の研究開発
に従事。



菊月 達也 (きくづき たつや)

(株) 富士通研究所
ICTシステム研究所
次世代無線システムを活用したソ
リユーション向け基盤技術の研究開発
に従事。



濱湊 真 (はまみなと まこと)

(株) 富士通研究所
ICTシステム研究所
ネットワーク分析・制御を中心にエッジコンピューティング基盤技術の研究開発に従事。



二宮 照尚 (にのみや てるひさ)

(株) 富士通研究所
ICTシステム研究所
次世代無線システムを活用したソリューション向け基盤技術の研究開発に従事。