

急激な環境変化に適応するレジリエンス指向情報通信技術の確立を目指して

代表研究者 須藤 克 弥 電気通信大学 大学院情報理工学研究科 助教

1 研究調査の目的・意義

近年、情報通信を用いた社会サービスの多様化に伴い、情報通信技術に多面的な性能が求められるようになってきた。また、災害など予知できない事象が発生する際は性能要求や環境の変化が激しいため、特定の要求や環境に適した従来型の情報通信技術では社会サービスの品質を保証することが困難である。そこで本研究では、性能要求や環境状態が急激に変化する状況においても社会サービスの品質を保証可能なレジリエンス指向情報通信技術の実現を目的とする。レジリエンス指向情報通信の実現には、情報の集約と制御命令の伝達に利用する通信用ネットワークが、レジリエンス特性の要求条件を満足する程度には十分安定であることが必要である。しなしながら、発災後のネットワークは、多数の通信インフラが故障するために使用可能な通信リソースに制限がある。そこで、レジリエンス指向情報通信では、ネットワーク自身が性能要求の多様性や変動を加味して限られた資源の最適な組み合わせを瞬時に決定する。さらに、社会サービス機能を回復するだけでなく、ネットワーク性能も回復するように決定することで、システム全体のレジリエンス特性を相乗的に向上することが可能である。これにより、レジリエンス特性を基本技術との比較で50%以上向上させることを目標とする。

2 国内外の研究動向

第5世代移動通信システム実現の必要要件として3GPPやITUが多様な通信性能を策定して以来、多様な通信性能の実現を目指す通信技術の研究開発は爆発的な広がりを見せている。しかしながら、従来研究の多くは各通信性能を個別に最適化することが目的であり、リアルタイムで観測される通信要求を満足するような技術の開発はされていない。これに対し本研究は、通信要求を基に通信性能を動的に変化させる通信技術を開発することでサービス品質を保証する。一方、通信性能の最大化ではなく、通信要求の満足を目指す研究はユーザ体感品質(QoE)の分野で検討が始まっている。しかしながら、これまでの研究は、通信性能とQoEの関係性を明らかにすることが目的であり、リアルタイムの通信要求を追従することは未だ検討されていない。以上の理由から、要求の多様性とダイナミック性を基に情報通信システムを構築する本研究課題は、他に類を見ない全く新しい情報通信の研究開発と位置づけられる。

図1はレジリエンス指向情報通信と第5世代移動通信の違いを示している。通信性能項目すべての最大化を目指している第5世代と異なり、レジリエンス指向情報通信は要求の変化に応じて使用する通信機器の選択や機器の役割を制御するため、必要最小限の資源で通信要求を満足できる。一方、環境変化によって情報

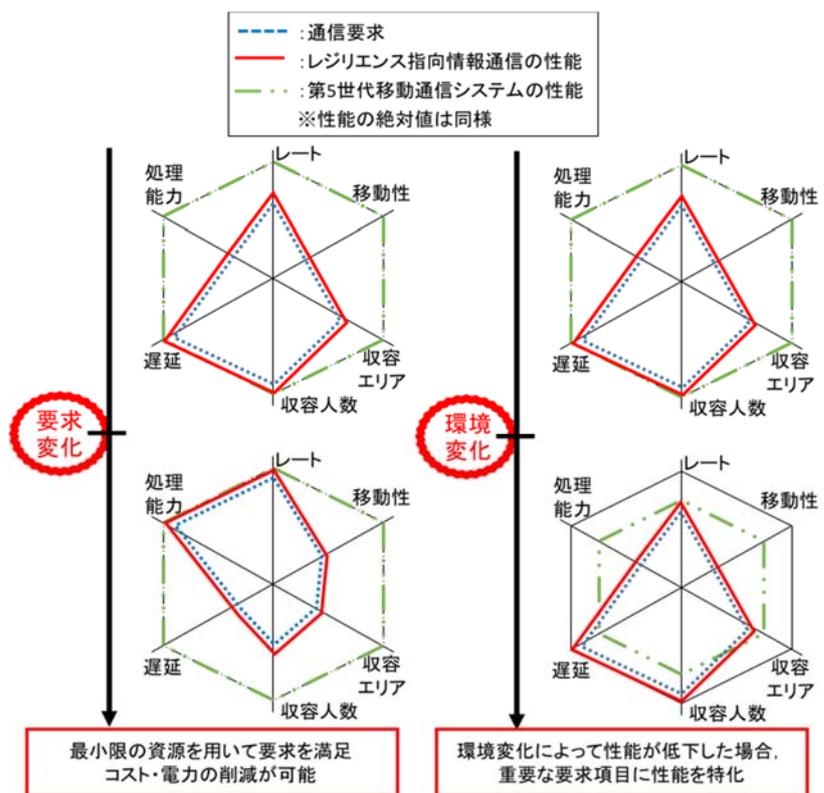


図1 第5世代移動通信システムとの違い

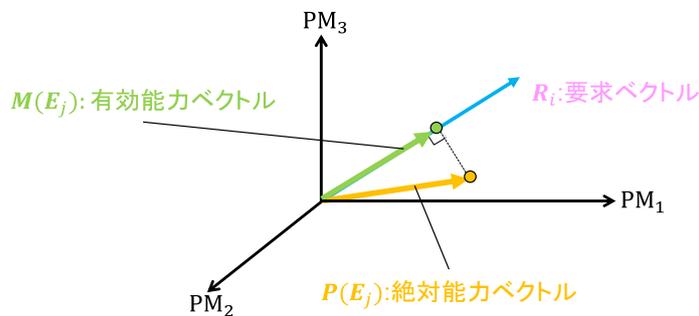
通信システムの性能が低下する場合、第5世代移動通信システムは要求を満足できなくなる可能性があるが、レジリエンス指向情報通信技術は限られた資源の配置や役割を最適化することによって、要求された性能を満足する。レジリエンス指向情報通信技術は、昆虫の相転移の様に環境に応じてその性質を変化させる技術であり、これは従来の情報通信技術とは全く異なる新しい領域の研究と言える。

3 レジリエント特性の評価方法

レジリエント特性は、状態が動的に変化する中で通信要求をどの程度満足しているかを評価するための指標である。状態の変化に追従して要求を満足する有効能力と状態の変化に対して自律的に安定した絶対能力を達成する能力がレジリエント特性向上の鍵となる。レジリエント特性を評価する上で必要となる3つの指標を提案する。

3-1 有効能力 (Effective Capability)

有効能力とは要求に対する通信システムの絶対能力の充足率を示す。本指標を評価する方法として2つの表現モデル（多次元モデルと1次元モデル）を提示する。多次元モデルでは、複数の通信項目について通信要求と絶対能力をベクトルで表現する。この表現モデルにおいては、要求ベクトルに対して写像した絶対能力ベクトルの大きさが有効能力となる（図1）。他方、1次元モデルはユーザ体感品質（QoE: Quality of Experience）を用いる。このモデルでは、多次元の通信項目を1次元のQoE値に変換することで、要求と絶対能力をスカラー量で表現する。要求スカラーに対する絶対能力スカラーの充足率を計算することで、有効能力を評価できる。既存研究において、各種通信項目とQoEの関係は既に明らかにされている。Fiedlerは実測データを基に音声通信サービスにおけるQoEとパケットロス率の関係を定式化している[6]。Zhangらは、対象の通信項目を複数に拡張しており、ニューラルネットワークを用いて任意のアプリケーションに対するQoEの値を導出する方法を提案している[22]。多次元モデルと1次元モデルを比較すると、通信項目毎の要求と絶対能力を考慮する多次元モデルは正確に有効能力を評価できる利点を持つが、軸間の重み付けを適切に決定する必要がある。他方、1次元モデルは、QoE値と通信項目群が単射の関数で表現可能な場合に有効能力を正確に評価できる。



$$\text{有効能力ベクトル: } M_i(E_j) = \frac{R_i \cdot P(E_j)}{|R_i|^2} R_i \quad (i, j \in N)$$

$$\text{有効能力: } |M_i(E_j)|$$

図2 多次元モデルにおける有効能力の評価方法の例

3-2 柔軟性 (Flexibility)

柔軟性とは通信ネットワークが自律的な制御によって達成可能な絶対能力の範囲である。多次元モデルにおいては達成可能な絶対能力ベクトルの組み合わせの数で表現し、1次元モデルにおいては達成可能なQoE値の領域によって評価する。環境発電型無線ネットワークを例に挙げると、ある時間スロット t のバッテリー量に応じて次の時間スロット $t+1$ の達成可能な絶対能力ベクトル数（QoE値）が変化する。そこで、 t における $t+1$ の達成可能な絶対能力ベクトル数が柔軟性であり、これを評価することで状態変化を考慮したシステム性能を計算できる。

3-3 適応性 (Adaptability)

状態変化に伴う要求値の変化と絶対能力の増減に適応するための能力を適応性と定義する。多次元モデルにおいては、絶対能力ベクトルが目的の絶対能力ベクトルに転移するまでに要する時間として定義できる。

異なる絶対能力ベクトルから同じ絶対能力ベクトルに転移する場合、要する時間が変化することが予測される。従って、動的に状態変化が発生する場合、このベクトルの転移時間を考慮して適切な絶対能力ベクトルを決定する必要がある。

NV (Network Virtualization) や SDN (Software Defined Network) 技術の導入が本格的に検討されている次世代無線ネットワークにおいては、複数の機能・特性を備えた通信装置・ネットワークシステムの開発が進んでいくことが予想される。通信装置の機能やネットワーク構成を柔軟に変更することで、サービスの要求に追従するネットワークを実現できる。このような技術背景から、サービスの要求に合わせた実質的な能力を示す有効能力、通信装置やネットワークが備える柔軟性や適応性といった特性を評価することは極めて重要である。これらの指標をシステム設計に取り入れることで、レジリエントな通信ネットワーク機器を開発できる。

4 環境発電で稼働する無線ネットワークにおけるレジリエンス指向情報通信技術

環境発電で稼働する無線ネットワーク (EH-SCN: Energy Harvesting Small Cell Network) を対象に、レジリエント特性評価を応用した通信制御技術を提案する。

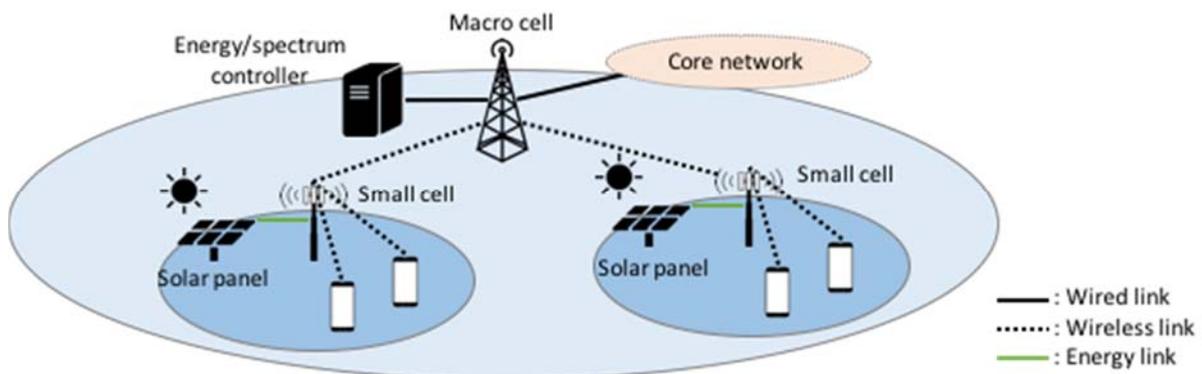


図3 EH-SCN の概念図

4-1 システムモデル

図3に想定するEH-SCNを示す。1台のマクロセル基地局 (MBS) とその周りに複数のスモールセル基地局 (SBS) が配置されるネットワークを想定する。SBSは高密度に配置することで周波数効率を向上できるが、SBSを稼働するために必要となる電力網の配線コストが膨大になるため、ソーラー発電等の環境発電を利用してSBSを稼働する (MBSは従来通り電力網から安定した電力・電圧を取得)。SBSは、送信電力制御とスリープ制御を用いることで限られた発電量を効率的に活用できるが[1,2,3]、時空間的に未接続ユーザが発生する。そこで、それらの未接続ユーザはMBSが収容する。このネットワークにおいては、MBSと接続するユーザ数をできる限り少なくすることで周波数効率と通信品質を向上できるため、SBSと接続するユーザ数を最大化するためのスリープ・送信電力制御に関して研究を行う。

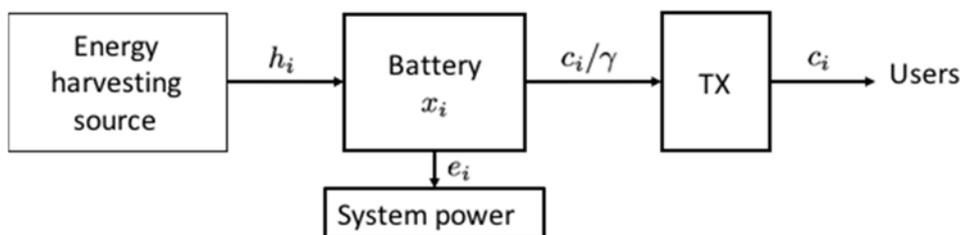


図4 SBS のシステムモデル

図4にSBSのモデル図を示す。SBSはソーラーパネルモジュール、バッテリーモジュール、光回線終端モジュール、通信処理・アンテナモジュールから構成される。ソーラーパネルモジュールで発電した電力 $h_i[k]$ はバッテリーモジュールに蓄えられる。バッテリーモジュールは光回線終端モジュールと通信処理・アンテナ

ナモジュールに電力を供給する。 t をタイムスロット間隔だとすると、タイムスロット $k+1$ における SBS- i のバッテリー状態 $b_i[k+1]$ は下記のダイナミクスを持つ。

$$b_i[k+1] = b_i[k] + t(h_i[k] - c_i[k]/\gamma - e_i[k])$$

ここで、 $c_i[k]$ 、 γ 、 $e_i[k]$ は送信電力、増幅効率、システム電力（各モジュールを稼働するために必要な消費電力）である。

上記の式から分かるように、 $b_i[k]$ と $h_i[k]$ の情報を基にしてタイムスロット毎に送信電力 $c_i[k]$ を決定することで、バッテリーを管理する必要がある。本稿では、直交振幅変調(QAM)を利用した VoIP 通信路を想定し、通信半径 d [m]以内のユーザの体感品質 Q を満足するために必要な送信電力を下記の式で計算する。

$$c_i[k] = \frac{5}{2} \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{8}{3} \operatorname{BER}(Q) \right) + N_{\text{sys}} + L_{\text{path}}(d)$$

ここで、 $\operatorname{BER}(Q)$ 、 N_{sys} 、 $L_{\text{path}}(d)$ は体感品質 Q を達成するために必要な最低ビットエラーレート、ユーザ端末で発生するシステムノイズ、 d [m]離れたユーザへのパスロスである。パケットサイズ S の通信における $\operatorname{BER}(Q)$ は、M. Fiedler が提唱した体感品質とパケットロス率の関係式[6]を基に下記のモデルで計算できる。

$$\operatorname{BER}(Q) = 1 - \exp \left(\frac{1}{S} \ln \left(1 + \frac{1}{4.473} \ln \left(\frac{Q - 1.065}{3.01} \right) \right) \right)$$

$L_{\text{path}}(d)$ は、市街地における通信環境を想定し、Walfishc-Ikegami モデル[7]を用いて計算できる。

$$L_{\text{path}}(d) = L_0(d) + L_{\text{rts}} + L_{\text{msd}}(d)$$

$$L_0(d) = 32.4 + 20 \log d + 20 \log f$$

$$L_{\text{rts}} = -16.9 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log(h_{\text{roof}} - h_{\text{user}}) + 3.25$$

$$L_{\text{msd}}(d) = 54 - 18 \log(1 + h_{\text{sbs}} - h_{\text{roof}}) + 18 \log d - 9 \log B - [4 + 1.5(f/925 - 1)]$$

ここで、 f はキャリア周波数、 h_{sbs} は SBS の高さ、 h_{user} はユーザの高さ、 h_{roof} はビルなどの構造物の高さ、 w は街路幅、 B はビルの隙間をそれぞれ示す。

送信電力制御に加えて、SBS はスリープ状態とアクティブ状態を切り替えることでシステム電力 $e_i[k]$ を制御する。

$$e_i[k] = \begin{cases} e_{\text{active}} & \text{if SBS-}i \text{ is active at time } k \\ e_{\text{sleep}} & \text{if SBS-}i \text{ is sleep at time } k. \end{cases}$$

アクティブ状態の SBS は全モジュールを稼働するため膨大な電力を消費する一方、スリープ状態の SBS は通信処理・アンテナモジュールと光回線終端モジュールの上り通信装置を機能停止することで消費電力を低減できる[4]。スリープ制御においては、スリープ SBS を多くするとアクティブ SBS の送信電力が大きくなり、アクティブ SBS を多くするとシステム電力を大量に消費する。したがって、バッテリー量や発電量を考慮してアクティブ・スリープ SBS 数を決定する必要がある。

VoIP サービスを要求するユーザ数は動的に変化する。一般的に発呼数は正午が多く、深夜に近づくにつれて減少するため、ユーザ数のダイナミクスを正午をピーク (δ) とした正規分布でモデル化する。

$$U[k] = \delta e^{-(k-720)^2/(3 \times 10^5)}$$

以上のシステムモデルから、EH-SCN の課題はユーザ数と発電量が増加する中で適切に送信電力とスリープを制御することだと分かる。

4-2 レジリエンス指向通信技術

4-1 でモデル化した EH-SCN におけるレジリエント特性の定義とその定義に基づくレジリエンス指向型通信技術を示す。

(a) 有効能力

4-1 で示した通り、送信電力制御によって体感品質と収容ユーザ数を決定できる。また、バッテリー量に制限のある EH-SCN では、体感品質と収容ユーザ数は独立した評価指標ではなく、高い体感品質レベルに設定すると必然的に収容ユーザ数は減少する。したがって、3-1 で示した有効能力評価が必要となる。言い換えれば、体感品質と収容ユーザ数に関する要求ベクトルを設定し、要求ベクトルを充足するように送信電力を決定する。したがって、要求ベクトルは下記の通り表現できる。

$$\mathbf{R}[k] = \{\alpha Q, U[k]\}$$

なお、 α は通信性能項目間の調整パラメータである。本稿では、ユーザが要求する体感品質は固定値として扱う。一方、収容ユーザ数に関する要求値は、フィールドに存在する接続要求ユーザ数であり、全てのユーザを収容した場合に有効能力が最大になる。なお、4-1で示した通り、接続要求ユーザ数は動的に変化するものとして扱う。以上の通り、体感品質とユーザ数に関する2次元の要求ベクトルに対して有効能力 $|\mathbf{M}(\mathbf{E})|$ を高めるように絶対能力 \mathbf{E} を制御することがレジリエント指向通信技術の目的となる。

(b) 柔軟性

EH-SCNにおける柔軟性は、バッテリー量に応じて実現可能な絶対能力ベクトル数（収容ユーザと体感品質の組み合わせ）が異なるため、将来的に保有するバッテリー量によって評価する。そこで、提案する制御アルゴリズムがタイムスロット k の制御命令 φ_k を決定する際には、区間 $[k, k+K]$ の間全タイムスロットで φ_k と同等の制御命令を実行できるようにする。これにより、発電量が減少する時間帯は現在の電力消費を抑えることで将来的な有効能力低減を防ぎ、発電量が増加する時間帯は消費電力を徐々に増やしつつ有効能力を向上する。

(c) 適応性

EH-SCNにおける適応性は、環境の変化に対応して適切な制御命令を決定する能力とそれまでに要する計算時間によって評価できる。EH-SCNでは、ユーザ数、体感品質、バッテリー量を考慮して制御機構を設計する必要があるが、複雑な最適化関数にすることは計算時間上望ましくない。そこで、計算時間の短いアルゴリズムを提案する。

(d) 制御命令決定アルゴリズム

本稿で提案するアルゴリズムは、モデル予測制御（MPC：Model Predictive Control）を利用し、各タイムスロットで未来のバッテリー量を予測しながら制御命令を決定する。最適化問題を高速に計算しながらフィードバック制御を行うことで、環境変動が発生する複雑なシステムに対して高性能な制御を実現できる。

タイムスロット k における決定アルゴリズムは下記の通りである。まず稼働するSBSを決定する。消費電力効率を最大化するアクティブSBS数 M をclosed-form（詳細は発表資料に記載）によって導出し、バッテリー量が多い順にアクティブSBSを M 個選出する。

次に、各稼働SBSの送信電力を決定する。(b)で述べた柔軟性を向上するためにSBS- i の送信電力の制限値 $\hat{c}_i[k]$ を設ける。 $\hat{c}_i[k]$ は、タイムスロット $k+K$ にて期待できるバッテリー量を区間 $[k, k+K]$ で平等に使った場合に達成可能な送信電力として定義する。

$$\hat{c}_i[k] = \frac{1}{K} \left(b[k] + \sum_{l=k}^{k+K} h[l] \right)$$

現在のバッテリー量と発電量（ $b[k]$ と $h[k]$ ）は既知の値であるが、区間 $[k+1, k+K]$ において $h[l]$ は未知の値である。一方で、 K は発電量が大きく変化しない期間であるため、本稿では $h[l]=h[k]$ とする。 $\hat{c}_i[k]$ を制約値として有効能力の最大化問題を解き、稼働SBSの送信電力の組み合わせを決定する。

$$\begin{aligned} & \arg \max && \sum_{i \in \mathbf{N}} \frac{\mathbf{R}_i[k] \cdot \mathbf{P}(c_i)}{|\mathbf{R}_i[k]|^2} \mathbf{R}_i[k] \\ & \text{subject to} && c_i \leq \hat{c}_i \end{aligned}$$

なお、 \mathbf{N} はSBSの集合、 $\mathbf{P}(c_i)$ は送信電力 c_i の時の絶対能力ベクトルを示す。この最適化問題は線形最適化問題であり、実時間で計算可能である。

4-3 従来の通信技術

表1に従来技術と提案技術の比較を示す。従来研究を大別すると、(1) 予測を用いたプリアリ情報に基づき最適化する方法[3,8-11]、(2) 消費電力効率を最適化する方法 [12-15]、(3) 取得した情報を学習し環境変化に適応して制御する方法がある[16-20]。(1)の方法では、発電量の変化を予測することで、各タイムスロットのバッテリー量を事前に求め、バッテリー枯渇が起らないように送信電力・稼働SBSを決定する。全てのタイムスロットの組み合わせ最適化問題を計算して制御命令を決定しており、達成可能な絶対能力の範囲（柔軟性）は高い。しかしながら、発電量の予測に誤差があった場合にバッテリーの枯渇が発生する恐れがあるため、環境変化に適応する能力は高くない。(2)の方法では、発電量・バッテリー量の変化を考慮せず

消費電力効率（収容人数/消費電力）を最大化するように消費電力・稼働 SBS を決定する。ダイナミクスを考慮しないため、数値最適化が容易であり、高速に制御命令を計算できる。しかしながら、バッテリー量と関係なく常に一定の消費電力・稼働 SBS 数になるため、将来的に達成可能な絶対能力の範囲を狭める恐れがある。したがって、(2) の方法は柔軟性と適応性を備えていない。(3) の方法では、各 SBS が自身で蓄積した過去の環境情報（発電量、ユーザ密度等）を基にして、環境ごとに有効な制御命令を学習する。従来研究では収容人数を評価関数とした強化学習アルゴリズムが提案されている。大量のサンプルデータを基にした事前学習や学習期間を長くすることで、環境の変化に対応した制御命令を導出することが可能であるが、サンプルに無い環境や環境情報の離散化誤差によって、性能が低下する。適応性や柔軟性は学習サンプルの性質に大きく影響する。

以上の従来研究では、複数の通信性能要求を考慮した有効能力を基に制御命令を決定するものは存在しておらず、その点においてレジリエンス指向通信技術に優位性がある。レジリエンス指向通信技術は、有効能力を考慮することで要求の変化に対応し、柔軟性と適応性を考慮することで環境の変化に対応した制御命令を決定可能である。

表 1 従来技術とレジリエンス指向通信技術の特徴比較

		有効能力	柔軟性	適応性
従来技術	(1) 予測を用いた最適化	×	○	×
	(2) 電力効率最適化	×	×	×
	(3) 学習を用いた制御	×	△	△
提案技術		○	○	○

4-4 性能評価

従来技術とレジリエンス指向通信技術の比較実験を行い、有効性を検証する。比較対象として、4-3 で示した予測を用いたプリアリ情報に基づく最適化方法を用いる。この手法では、発電量を予測により知ること、シミュレーション時間内の全タイムスロットにおける稼働 SBS と送信電力を事前に決定する。ユーザ収容数の総和を最適化関数、4 以上の体感品質レベルとバッテリーが枯渇しないといった制約条件を設けた最適化問題を解くことで、稼働 SBS と送信電力の組み合わせを決定する。

$$\begin{aligned} & \arg \max && \sum_{k \in \mathbf{K}} \sum_{i \in \mathbf{N}} U_i[k] \\ & \text{subject to} && Q > 4 \\ & && h_i[k] > 0 \end{aligned}$$

なお、 \mathbf{K} はタイムスロットの集合、 $U_i[k]$ は SBS- i の収容ユーザ数を示す。この問題は組み合わせ最適化問題であるため、近似解を取得するために粒子群最適化手法[21]を採用する。タイムスロット k における SBS- i の発電量 $h_i[k]$ は正午をピーク (ρ) とした正規分布モデルで予測する。

$$h_i[k] = \rho e^{-(k-720)^2 / (8 \times 10^4)}$$

このモデルは、 ρ の値を変更することで様々な日照量・天候に対応することが可能であり、汎用性の高さから多くの既存研究で利用されている[5]。一方、この従来手法の問題は下記のとおりである。(1) 要求される体感品質が変化する場合に、体感品質を保証できない事や必要以上に高い送信電力を設定してしまう事、(2) 環境変化により実際の発電量が予測値よりも大きく異なる場合でも、事前に決定した制御命令が利用されるため、バッテリーの枯渇が発生するといった問題がある。そこで本実験では、この問題をレジリエンス指向通信技術が解決できることを示す。表 2 に示したパラメータを用いてシミュレーションを行った。

表2 パラメータ設定

パラメータ	値
フィールドサイズ	2×2 km ²
最大バッテリー量	40000 J
タイムスロット長	60 秒
増幅効率	0.32
SBS 数	12 台
アクティブ時のシステム電力	5 W
スリープ時のシステム電力	0.5 W
システムノイズ	-138.8 dBm
パケットサイズ	12000 bit
ピーク時のユーザ数	790 人
予測ピーク電力	8 W
要求体感品質	4

まず、環境変化時の性能評価を行うため、実際のピーク電力を6~10 Wに設定しシミュレーションを行う(図5)。予め設定した制御命令を利用して稼働 SBS と送信電力を決定する従来手法は、予測よりも発電量が多い場合でも、送信電力を上げないため有効能力が向上しない。一方、予測よりも発電量が少ない場合は、バッテリーの枯渇が発生し SBS が稼働できなくなるため、有効能力が著しく低下する。これに対し、提案手法は、現在のバッテリー量と発電量を基に各タイムスロットで稼働 SBS と送信電力を決定するため、発電量の増減に対応して適切な制御命令を決定できる。従来手法と比較して、予測値に誤差がある場合に提案手法の優位性を確認できる。提案手法は、環境変化時における柔軟性と適応性を備えた手法であることが分かる。

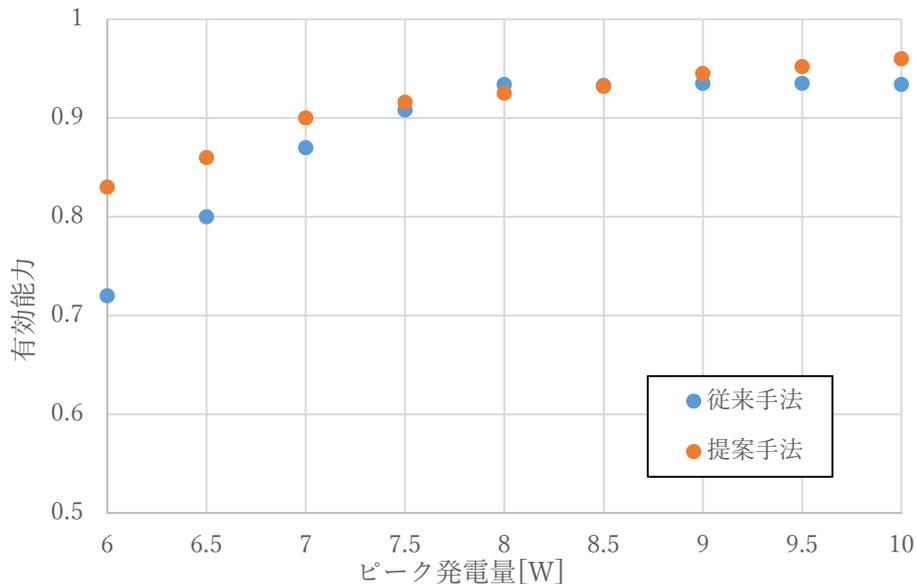


図5 ピーク発電量の変化が有効能力に与える影響

次に、要求変化時の性能評価を行うため、要求体感品質を3に変更、実際のピーク電力を6~10 Wに設定しシミュレーションを行う(図6)。従来手法は、要求体感品質を4に設定して制御命令を決定しているため、不必要に送信電力を高く設定している。このため、低い要求体感品質であるにも関わらず、有効能力がそれ程向上していない。一方、提案手法は、要求体感品質の変更に合わせて要求ベクトルを設定し、体感品質レベル3に対応して送信電力を決定している。消費電力を大幅に削減し、発電量が低い時間帯の収容ユーザ数を向上したため、有効能力が著しく向上している。以上のことから、要求変化時における有効能力を保証できる手法であることが分かる。

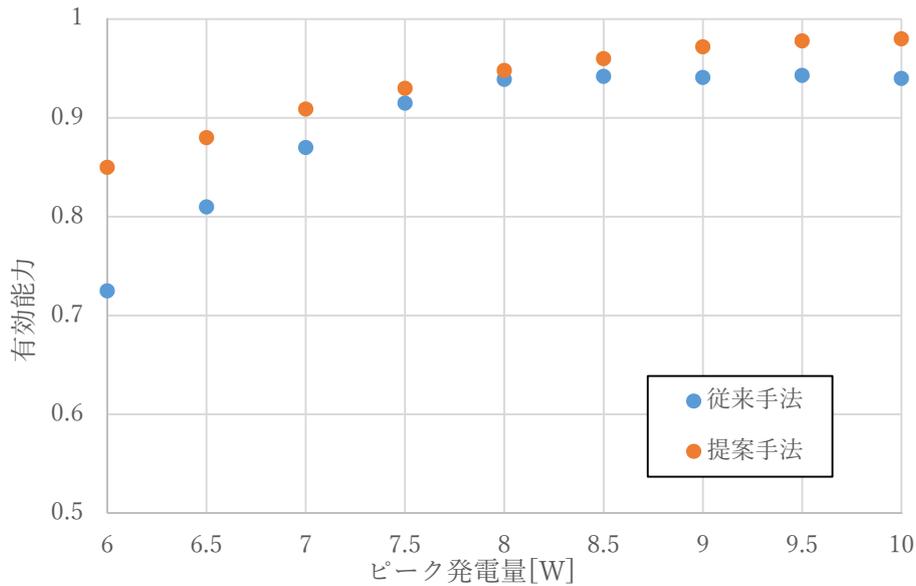


図 6 体感品質の要求値が変化した時の有効能力

5 研究調査結果、今後の課題

本調査では、IoT 時代に必要不可欠である性能要求と環境の変化に対応可能な情報通信技術の研究を行った。性能要求と環境の変化に対応するために必要な能力（レジリエンス特性）を評価する方法を提案し、有効能力、柔軟性、適応性が重要な指標であることを示した。レジリエンス特性の評価方法を EH-SCN に適用し、有効能力、柔軟性、適応性を考慮した制御アルゴリズムを提案した。提案アルゴリズムは、従来手法で解決できなかった性能要求と環境の変化にロバストであり、有効能力を大幅に改善できることをシミュレーションにより確認した。

本調査では、EH-SCN の課題であったバッテリー量のダイナミクスを解決することを目的としてレジリエンス指向通信技術を提案したが、他のネットワークにおける要求と環境のダイナミクスの調査並びにレジリエンス指向通信技術による解決を継続して行っていく。

【参考文献】

- [1] K. Suto, K. Miyanabe, H. Nishiyama, N. Kato, H. Ujikawa, and K. Suzuki, "QoE-guaranteed and power-efficient network operation for cloud radio access network with power over fiber," *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, vol. 2, pp. 127–136, 2015.
- [2] Z. Niu, Y. Wu, J. Fong, and Z. Yang, "Cell zooming for cost-efficient green cellular networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, pp. 74–79, 2010.
- [3] S. Zhang, N. Zhang, S. Zhou, J. Gong, Z. Niu, and X. Shen, "Energy-aware traffic offloading for green heterogeneous networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, pp. 1116–1129, 2016.
- [4] Keisuke Miyanabe, Katsuya Suto, Zubair Md. Fadlullah, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, Hirotaka Ujikawa, and Ken-Ichi Suzuki, "A cloud radio access network with power over fiber toward 5g network: qoe-guaranteed design and operation," *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no. 4, pp. 58-64, Aug. 2015.
- [5] W. Yao et al., "New decomposition models to estimate hourly global solar radiation from the daily value," *Elsevier Solar Energy*, vol. 120, pp. 87-99, Oct. 2015.
- [6] M. Fiedler, T. Hossfeld, and P. Tran-Gia, "A generic quantitative relationship between quality of experience and quality of service," *IEEE Network*, vol. 24, no. 2, pp. 36-41, Mar.-Apr. 2010.
- [7] L. Barclay, "Propagation of radiowaves (2nd Edition)," IET, 2003.
- [8] D. Ng, E. Lo, and R. Schober, "Energy-efficient resource allocation in OFDMA systems with hybrid energy harvesting base station," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 7, pp. 3412-3427, July, 2013.
- [9] S. Zhou, J. Gong, and Z. Niu, "Sleep control for base stations powered by heterogeneous energy sources", in *IEEE ICTC'13*, Jeju Island, Korea, Oct. 2013.
- [10] T. Han and N. Ansari, "On optimizing green energy utilization for cellular networks with hybrid energy supplies," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 8, pp. 2872-2882, Aug. 2013.
- [11] J. Gong, J. Thompson, S. Zhou, and Z. Niu, "Base station sleeping and resource allocation in renewable energy powered cellular networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, issue 11, pp. 3801-3813, Nov. 2014.
- [12] J. Yang, S. Ulukus, "Optimal packet scheduling in an energy harvesting communication systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 60, no. 1, pp. 220-230, Jan. 2012.
- [13] Q. Ye, B. Rong, Y. Chen, M. Shalash, C. Caramanis, and J. Andrews, "User association for load balancing in heterogeneous cellular networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 12, no. 6, pp. 2706-2716, June 2013.
- [14] S. Zhang, J. Gong, S. Zhou, and Z. Niu, "How many small cells can be turned off via vertical offloading under a separation architecture?", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, issue 10, pp. 5440-5453, June 2015.
- [15] J. Andrews, S. Singh, Q. Ye, X. Lin, and H. Dhillon, "Energy-efficiency oriented traffic offloading in wireless networks: a brief survey and a learning approach for heterogeneous cellular networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, issue 4, pp. 627-640, Jan. 2015.
- [16] P. Blasco, D. Gunduz, and M. Dohler, "A learning theoretic approach to energy harvesting communication system optimization," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, issue 4, pp. 1872-1882, Apr. 2013.
- [17] W-T. Lin, et al., "Distributed energy cooperation for energy harvesting nodes using reinforcement learning," *IEEE PIMRC*, Dec. 2015.
- [18] M. Miozzo, et al., "Switch-on/off policies for energy harvesting small cells through distributed q-learning," *IEEE WCNCW*, May. 2017.

- [19] Y. Wei, et al., “User scheduling and resource allocation in hetnets with hybrid energy supply: an actor-critic reinforcement learning approach,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 17, no. 1, Jan. 2018.
- [20] M. Mendils, et al., “Battery-aware optimization of green small cells: sizing and energy management,” IEEE Trans. Green Commun. & Netw, Apr. 2018, published online.
- [21] D. P. Tian “A review of convergence analysis of particle swarm optimization,” Int. J. Grid & Dist. Comput., vol. 6, no. 6, pp. 117-128, Dec. 2013.
- [22] K. Zheng et al., “Quality-of-experience assessment and its application to video services in lte networks,” IEEE Wireless Communications, vol. 22, no. 1, pp. 70-78, Feb. 2015.

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
QoE-Guaranteed and Sustainable User Position Guidance for Post-Disaster Cloud Radio Access Network	IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)	2016年12月
Post-Disaster User Location Maneuvering Method for Improving the QoE Guaranteed Service Time in Energy Harvesting Small Cell Networks	IEEE Transactions on Vehicular Technology	2017年10月
Model Predictive Cell Zooming for Energy-harvesting Small Cell Networks	IEEE International Conference on Communications (ICC)	2018年5月