

# 確率的バイナリーオフロードを用いた Wireless Powered MEC の特性評価

小林 拓弥<sup>†</sup> 安達 宏一<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 電気通信大学 先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター

〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

E-mail: †{t.kobayashi,adachi}@awcc.uec.ac.jp

あらまし モノのインターネット (IoT: Internet-of-Things) 端末の小型化に伴う計算能力の制約ならびに電源管理が重要な検討事項となっている。無線端末 (WD: Wireless Device) のタスクを代替計算処理するモバイルエッジコンピューティング (MEC: Mobile Edge Computing) と、アクセスポイント (AP: Access Point) から WD へ無線高周波 (RF: Radio Frequency) 信号を送り、エナジーハーベスティング (EH: Energy Harvesting) を行う無線電力伝送 (WPT: Wireless Power Transfer) を組み合わせた Wireless Powered-MEC (WP-MEC) システムによって 2 つの問題を解決することが期待されている。多くの先行研究ではオフロード端末の決定や WPT の割当等を AP による集中制御によって行っているが、この制御法は通信やエネルギーに大きなオーバーヘッドを生じさせてしまう。本稿では、AP による集中制御ではなく自律分散型の確率的制御によってオフロードとローカル計算の 2 つのモードを選択する確率的バイナリーオフロード (PBO: Probabilistic Binary Offloading) システムを提案する。このシステムに対し WPT を行った場合のエネルギー消費量及びタスクの処理遅延を評価する。

キーワード センサネットワーク, IoT, MEC, WPT, 確率的制御

## Probabilistic Binary Offloading for Wireless Powered-MEC and Its Performance Evaluation

Takuya KOBAYASHI<sup>†</sup> and Koichi ADACHI<sup>†</sup>

<sup>†</sup> The University of Electro-Communications, Advanced Wireless & Communication Research Center,

1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo, 182-8585 Japan

E-mail: †{t.kobayashi,adachi}@awcc.uec.ac.jp

**Abstract** The limitation of computing power due to the miniaturization of Internet-of-Things (IoT) and their battery charge management are critical issues. Mobile edge computing (MEC) that computes heavy tasks of wireless devices (WDs) is a solution for the problem of computing. Wireless power transfer (WPT) that charges batteries of WDs from the access point (AP) is a solution for battery management. Recently, wireless powered MEC (WP-MEC) system combining WPT and MEC has been proposed. In this paper, we propose a probabilistic binary offloading (PBO) strategy. By PBO, each WD probabilistically selects one of two modes, i.e., offloading and local computation, instead of centralized control by the AP. We aim to reduce the energy consumption of WDs and task processing delay by combining this system with WPT.

**Key words** Sensor Network, IoT, MEC, WPT, Probabilistic Control

## 1. はじめに

近年、センサとネットワークを接続する通信規格の標準化に伴い、モノのインターネット (IoT: Internet of Things) が発展している [1]。IoT ネットワークでは狭い範囲に多数のセンサを配置するような環境が想定されている。IoT 機器やセンサの小型化につれて計算能力が低下し、端末内で計算処理を行うには限界があることが問題となっている。この問題を解決する技術として、モバイルエッジコンピューティング (MEC: Mobile Edge Computing) が挙げられる [2]。この技術は、アクセスポイント (AP: Access Point) に具備された高性能なサーバ上で無線端末 (WD: Wireless Device) のタスクを代わりに計算処理することで、WD の計算能力を補うことができる。従来のクラウドコンピューティングでは、WD とクラウドサーバ間の物理的距離が大きいことで計算結果が WD に返ってくるまでの通信の遅延が大きいことが問題であったのに対し、MEC は WD とサーバ間の物理的距離が小さいため、低遅延の対話型応答を可能にする。一方で、増加する IoT 機器やセンサに対し、各端末の充電管理をどのように行うかが問題となっている。この問題を解決する技術として、無線電力伝送 (WPT: Wireless Power Transfer) が挙げられる [3]。これは、AP から WD へ無線高周波 (RF: Radio Frequency) 信号を送り、受信した RF 信号を WD 内で直流電流 (DC: Direct Current) に変換するエナジーハーベスティング (EH: Energy Harvesting) を行うことでバッテリーを充電する技術である。得られたエネルギーを WD の通信回路や計算回路に充てることで、有線充電無しでセンサ端末を稼働することが可能になる。これら 2 つの技術を組み合わせた Wireless Powered MEC (WP-MEC) システムによって、以上の問題を同時に解決することが期待されている [4]。WP-MEC に関する多くの既存研究では AP における集中制御型のオフロードシステムを検討している [5] [6]。このようなシステムでは制御情報のやり取りによって処理遅延やエネルギー消費に関するオーバーヘッドが発生してしまう問題がある。

また、MEC のオフロード方式にはパーシャルオフロード (Partial Offloading) とバイナリーオフロード (Binary Offloading) が存在する。パーシャルオフロードは WD で生じた 1 つのタスクをオフロード部分とローカル計算部分に分割することで、時間を有効に使うことを可能にする。しかし、この方式はセンサが生じるような分割することの出来ない単純なタスクには不向きである。バイナリーオフロードは WD で生じた 1 つのタスクを分割せず、オフロードまたはローカル計算のどちらかで処理をする方式である。MEC サーバと WD で同時に計算を行えない分時間を有効に使えない欠点はあるが、分割の処理を省略し、単純化することができる。

そこで本研究では、バイナリーオフロードに対して確率的な制御を行う自律分散型の確率的バイナリーオフロード (PBO: Probabilistic Binary Offloading) システムを提案する。このシステムに対し WPT を適用することで、各 WD のバッテリー消費を抑えつつ大きな計算能力を提供することが可能である。更に、PBO でのオフロード確率を提案し、これを用いた場合の評価

を、理想的にバイナリーオフロードを行う場合と比較して行う。

本稿の構成は、以下の通りである。第 2 節で本稿で使用したシステムモデルと評価を行うパラメータの定義について説明し、第 3 節で提案方式である確率的バイナリーオフロードと、AP でオフロードタスクを受信失敗した場合のモード切替について説明する。第 4 節で計算機シミュレーションの結果について説明し、第 5 節で本論文のまとめを行う。

## 2. システムモデル

MEC サーバを具備した AP と  $K$  台の WD (集合  $K$ ) を仮定する。

### 2.1 タスク生起モデル

各 WD の計算タスクは、ポアソン過程 [7] に従ってランダムに生起するものとする。WD  $k \in K$  の  $i$  番目のタスクが生起する時間  $t_{k,i}$  は次式で表される。

$$t_{k,i} = t_{k,i-1} + \frac{\log X}{\lambda} \quad (1)$$

ここで、 $\lambda$  はポアソン過程の到着率 [1/sec]、 $X$  は  $(0, 1)$  の一様分布に従って生起される乱数である。以降はポアソン過程の到着率をタスク生起率と表記する。

### 2.2 チャネルモデル

オフロード時の上りリンクと下りリンク及び WPT で使用するチャネルモデルには自由空間伝搬損失を仮定する。

WD  $k$  のチャネル電力利得  $g_k^t$  は次式で与えられる。

$$g_k^t = \left[ \frac{\lambda^t}{4\pi(d_k + 1)} \right]^2 G \quad (2)$$

ここで、 $G$  は送受信アンテナの利得の積を表す。 $\mathbf{t} = \{\text{off}, \text{wpt}\}$  とし、それぞれオフロード搬送波、WPT 搬送波に関するパラメータとする。

### 2.3 バイナリーモード

バイナリーオフロードは、WD で生じたタスクを MEC サーバへ全てオフロードするか全てローカル計算を行うかの 2 つのモードをタスクごとに選択するオフロード方式である [2]。ここで、タスクをオフロードする場合をモード 0 ( $\mathcal{M}_0$ )、ローカル計算する場合をモード 1 ( $\mathcal{M}_1$ ) と定義する。WD  $k$  の  $i$  番目タスクのモードを  $m_{k,i} \in \{\mathcal{M}_0, \mathcal{M}_1\}$  とする。

#### 2.3.1 タスクオフロード ( $m_{k,i} \in \mathcal{M}_0$ )

モード 0 が選択された時、各 WD は AP へのタスクオフロードを行う。本研究では、タスクオフロード時のランダムアクセス方式として ALOHA 方式 [8] を採用する。全 WD はオフロード時に同一のチャネルを使用するものとし、異なる WD が同時にタスクの送信をした場合パケット衝突が発生するものとする。パケット衝突が発生した場合には、キャプチャ効果などは考慮せず、衝突パケットは受信失敗とする。また、AP が WD に計算結果を返送している場合はパケット衝突の有無に関わらず、受信失敗するものとする。この時、AP から WD への計算結果の返送は WD の送信失敗に関わらず必ず成功するものとする。WD がタスクをオフロードした場合には、AP からタスク返信の有無によりオフロードの成功・失敗を判定できるものとする。

WD はオフロード送信電力を理想的に制御可能であると仮定し、変調方式によって与えられる最大容量を超えないように電力制御を行う。シャノンの通信路容量定理 [9] より、送信電力  $P_k^{\text{off}}$  は次式で与えられる。

$$P_k^{\text{off}} = \begin{cases} \frac{(2^{C^{\text{max}}} - 1)\sigma^2}{g_k^{\text{off}}} & (\text{if } C_k \geq C^{\text{max}}) \\ P_{\text{WD}}^{\text{max}} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $\sigma^2$  は雑音電力 [W],  $C^{\text{max}}$  は最大容量 [bit/sec/Hz],  $P_{\text{WD}}^{\text{max}}$  は WD の最大送信電力 [W] を表す。

WD  $k \in \mathcal{K}$  から AP への  $i$  番目タスクの送信時間  $\tau_{k,i}^{\text{off}}$  は次式で与えられる。

$$\tau_{k,i}^{\text{off}} = \frac{L_{k,i}}{R_k} = \frac{L_{k,i}}{B \log_2 \left( 1 + \frac{g_k^{\text{off}} P_k^{\text{off}}}{\sigma^2} \right)} \quad (4)$$

ここで、 $L_{k,i}$  はオフロードタスクサイズ [bits],  $R_k$  は送信レート [bits/sec],  $B$  は帯域幅 [Hz] を表す。

オフロードに必要なエネルギーは次式で表される。

$$E_{k,i}^{\text{off}} = \tau_{k,i}^{\text{off}} P_k^{\text{off}} = \frac{L_{k,i}}{B \log_2 \left( 1 + \frac{g_k^{\text{off}} P_k^{\text{off}}}{\sigma^2} \right)} P_k^{\text{off}} \quad (5)$$

また、WD  $k$  からオフロードされた  $i$  番目計算タスクの MEC での計算時間  $\tau_{k,i}^{\text{M}}$  は次式で与えられる。

$$\tau_{k,i}^{\text{M}} = \frac{A_k L_{k,i}}{f^{\text{M}}} \quad (6)$$

ここで、 $f^{\text{M}}$  は MEC の CPU 周波数 [Hz] ([CPU cycles/sec]),  $A_k$  は 1bit の処理当たりの CPU サイクル数 [CPU cycles/bit] を表す。以降、 $A_k$  をタスクタイプと表記する。オフロードされたタスクの計算結果の返送時間  $\tau_{k,i}^{\text{re}}$  は次式で与えられる。

$$\tau_{k,i}^{\text{re}} = \frac{H_{k,i}}{R^{\text{M}}} = \frac{H_{k,i}}{B \log_2 \left( 1 + \frac{g_k^{\text{off}} P^{\text{M}}}{\sigma^2} \right)} \quad (7)$$

ここで、 $H_{k,i}$  は計算結果のタスクサイズ [bits],  $R^{\text{M}}$  は MEC の送信レート [bits/sec],  $P^{\text{M}}$  は計算結果の返送電力 [W] を表す。MEC の送信電力は WD の送信電力と同様に最大容量に従って電力制御を行うものとする。

### 2.3.2 ローカル計算 ( $m_{k,i} \in \mathcal{M}_1$ )

モード 1 が選択された時、各 WD は内部の計算回路を用いて処理をする、ローカル計算を行う。WD  $k$  の  $i$  番目タスクのローカル計算時間  $\tau_{k,i}^{\text{loc}}$  は次式で与えられる。

$$\tau_{k,i}^{\text{loc}} = \frac{A_k L_{k,i}}{f_k} \quad (8)$$

ここで、 $f_k$  は WD の CPU 周波数 [Hz] ([CPU cycles/sec]) を表す。ローカル計算の電力は CPU 実効キャパシタンス係数  $\zeta_k$  を用いると、 $\zeta_k f_k^3$  で表される [10]。ローカル計算に必要なエネルギーは次式で表される。

$$E_{k,i}^{\text{loc}} = \zeta_k f_k^3 \tau_{k,i}^{\text{loc}} = \zeta_k f_k^2 A_k L_{k,i} \quad (9)$$

### 2.4 WPT

各 WD に対してビームフォーミングを用いて WPT を実行

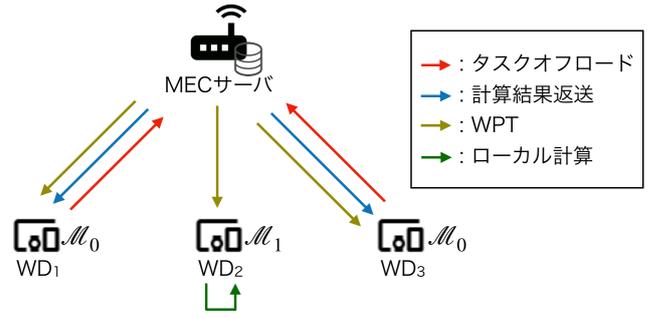


図 1 バイナリーオフロードを用いた WPMEC システムの概略図

する。ビームによる EH は 1 台ずつ行うとし、ビームの切り替えは全 WD に対し時間が均等になるように実行する。WD  $k$  の EH で得られるエネルギー量は次式で表される。

$$E_k^{\text{wpt}} = \tau_k^{\text{wpt}} \eta_k g_k^{\text{wpt}} P^{\text{wpt}} \quad (10)$$

ここで、 $\tau_k^{\text{wpt}}$  は WPT の実行時間 [sec],  $\eta_k$  は WD の EH 効率,  $P^{\text{wpt}}$  は AP の WPT 送信電力 [W] を表す。

### 2.5 タスク処理時間及びエネルギー蓄積量

本研究では処理遅延及び WD のエネルギー蓄積量を評価する。タスクが生起してからオフロードしたタスクの全ての計算結果を受け取る、もしくは全てローカル計算し終わるまでをタスク処理時間と定義する。WD  $k$  の  $i$  番目タスク処理時間  $T_{k,i}$  は次式になる。

$$T_{k,i} = \begin{cases} \tau_{k,i}^{\text{off}} + \tau_{k,i}^{\text{M}} + \tau_{k,i}^{\text{re}} & (m_{k,i} \in \mathcal{M}_0) \\ \tau_{k,i}^{\text{loc}} & (m_{k,i} \in \mathcal{M}_1) \end{cases} \quad (11)$$

また、WD のエネルギー蓄積量はオフロード送信、ローカル計算、EH のみに依存すると仮定する。WD のバッテリーに充電されているエネルギー蓄積量  $\varepsilon_{k,i}$  は次式で表される。

$$\varepsilon_{k,i} = \begin{cases} \max(\varepsilon_{k,i-1} + E_k^{\text{wpt}} - E_{k,i}^{\text{off}}, 0) & (m_{k,i} \in \mathcal{M}_0) \\ \max(\varepsilon_{k,i-1} + E_k^{\text{wpt}} - E_{k,i}^{\text{loc}}, 0) & (m_{k,i} \in \mathcal{M}_1) \end{cases} \quad (12)$$

## 3. 提案手法

### 3.1 確率的バイナリーオフロード

バイナリーオフロードを使用した WP-MEC において、オフロード処理またはローカル計算の 2 つのモードを確率的制御によって自律分散的に選択する確率的バイナリーオフロード (PBO: Probabilistic Binary Offloading) システムを提案する。本手法では、WD  $k \in \mathcal{K}$  に対してそれぞれオフロード確率  $p_k \in [0, 1]$  を割り当てる。例えば、 $p_k = 1.0$  の時はオフロードを行うモード 0,  $p_k = 0.0$  の時はローカル計算を行うモード 1 を確実に選択する。バイナリーオフロードを用いた WP-MEC を適用した概略図は図 1 のようになっている。

オフロード確率は各 WD 内で自律分散的に設定し、確率に基づいて自身のモードを決定する。本研究では、オフロード確率

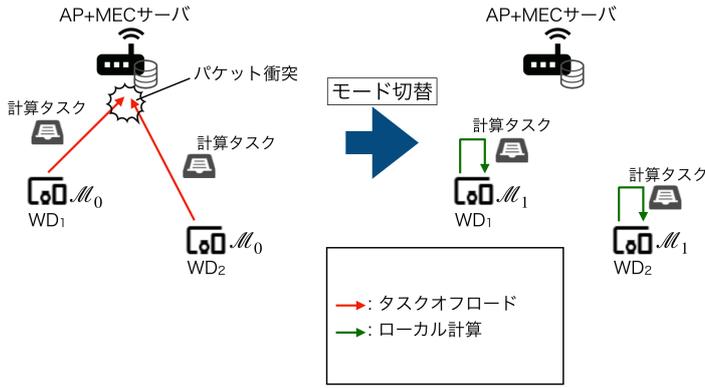


図2 モード切替の概略図

の時間的な変更は行わず、各 WD で固定とする。

WD でオフロード処理を行うために必要なエネルギーは、WD と AP 間の距離が近いほど小さくなる。これより、本研究では、次式で与えられるオフロード確率  $p_k$  を用いる。

$$p_k = 1 - \frac{f(d_k)}{f(d^{\max})} \quad (13)$$

ここで、 $d_k$  は WD  $k$  から AP までの距離 [m]、 $d^{\max}$  は最大通信距離 [m] を表す。関数  $f(x)$  は様々なものが考えられる。本研究では、WD のオフロードでのエネルギー消費量の式より、エネルギー消費量が  $O\left(\left\{\log_2\left(1 + \frac{1}{x^2}\right)\right\}^{-1}\right)$  に従うことから、次式を使用する。

$$f(x) = \frac{1}{\log_2\left(1 + \frac{1}{x^2}\right)} \quad (14)$$

エリア端でのオフロードのエネルギー消費量がローカル計算よりも大きい場合、この式を用いることで、オフロード確率を全 WD に対して固定にする場合に比べてエリア端に配置された WD のバッテリー寿命を伸長することが可能になる。また、AP から離れた WD が優先的にローカル計算処理をすることで、全体の送信数を減らしてパケット衝突率を低減することが可能となる。

### 3.2 オフロード失敗時のモード切替

通常のランダムアクセス方式では AP で WD の送信パケットを正しく受信できた場合、受信できたことを通知する ACK(acknowledgement) 信号を WD に送信する。ACK 信号を受信できなかった WD はバックオフを用いた再送処理を行う。本研究では、パケット衝突が発生するか、計算結果返送時にオフロードし、ACK 信号を受信できなかった WD は再送処理を行わず、オフロードを中止してモード 0 からモード 1 に切り替えてローカル計算を行うモード切替方式を使用する。この方式によって、処理に失敗することなく全てのタスクを処理することが可能となる。図 2 にパケット衝突時のモード切替の概略図を示す。

## 4. 計算機シミュレーション

### 4.1 シミュレーション諸元

シミュレーション諸元を表 1 に示す [5] [6]。ここで、WD

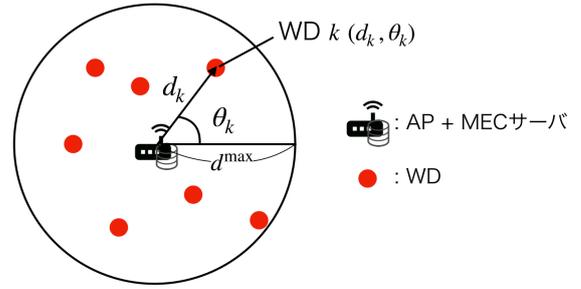


図3 シミュレーションエリア

表 1 シミュレーション諸元

パラメータ	値
最大通信距離 $d^{\max}$	50 [m]
WD 数 $K$	50
タスクタイプ $A_k$	$10^3$ [CPU cycles/bit]
シミュレーション時間 $T$	100.0 [sec]
ACK 信号待機時間 $T^{\text{ack}}$	0.5 [sec]
生起タスクサイズ $L_k$	[10, 100] [kbits]
計算結果のタスクサイズ $H_k$	$[L_k/100, L_k/10]$ [bits]
CPU キャパシタンス係数 $\zeta_k$	$10^{-29}$
EH 効率 $\eta_k$	0.3
タスク生起率 $\lambda$	0.1 [1/sec]
WD の CPU 周波数 $f_k$	[10, 50] [MHz]
MEC の CPU 周波数 $f^{\text{M}}$	10 [GHz]
WPT 実行時間 $\tau_k^{\text{wpt}}$	1.0 [sec]
雑音電力 $\sigma^2$	$10^{-11}$ [W]
AP の WPT 送信電力 $P^{\text{wpt}}$	3 [W]
WPT 搬送波周波数 $f_c^{\text{wpt}}$	915 [MHz]
オフロード搬送波周波数 $f_c^{\text{off}}$	2.4 [GHz]
送受信アンテナ利得の積 $G$	4.11
初期エネルギー蓄積量 $\epsilon_{k,0}$	$10^{-3}$ [J]

$k \in \mathcal{K}$  の位置は距離  $d_k \sim \mathcal{U}(0, 50)$ 、角度  $\theta_k \sim \mathcal{U}(0, 2\pi)$  [rad] によって決定され、固定配置されているものとする。 $\mathcal{U}(a, b)$  は  $[a, b]$  の一様分布を表す。図 3 にシミュレーションエリアのモデルを示す。

また、WD のオフロード送信パケットの最大変調方式は QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) とするため、最大チャネル容量は  $C^{\max} = 2$  [bit/sec/Hz] となる。帯域幅は  $B = 2$  [MHz] と設定し、最大送信レートは  $R^{\max} = 4$  [Mbps/sec] となる。WD のオフロード時の最大送信電力は  $P_{\text{WD}}^{\max} = 20$  [mW]、AP の計算結果の最大返送電力は  $P_{\text{M}}^{\max} = 100$  [mW] とした。

### 4.2 シミュレーション結果

#### 4.2.1 エネルギー消費量の比較

WD  $k$  と AP 間の距離  $d_k$  に応じてオフロード処理におけるエネルギー消費量は変化する。そこで、提案法を用いた場合のエネルギー消費量と、 $p_k = 1.0$  及び  $p_k = 0.0$  の場合のエネルギー消費量を比較する。シミュレーション時間  $T = 500$  [sec]、エリア半径  $d^{\max} = 100$  [m] における、距離  $d_k$  による WD の総エネルギー消費量  $E_k^{\text{cons}} = \sum_i (E_{k,i}^{\text{off}} + E_{k,i}^{\text{loc}})$  の特性を図 4 に示す。この図より、WD の総エネルギー消費量は全ローカル

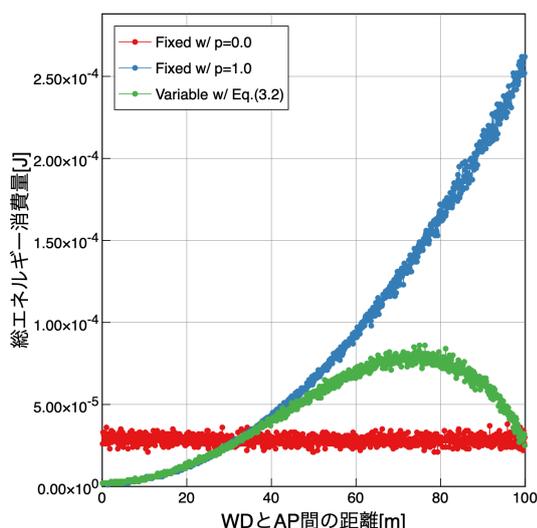


図4 シミュレーション時間  $T = 500$  [sec] での WD の総エネルギー消費量

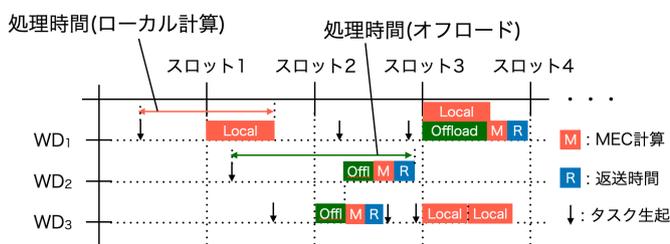
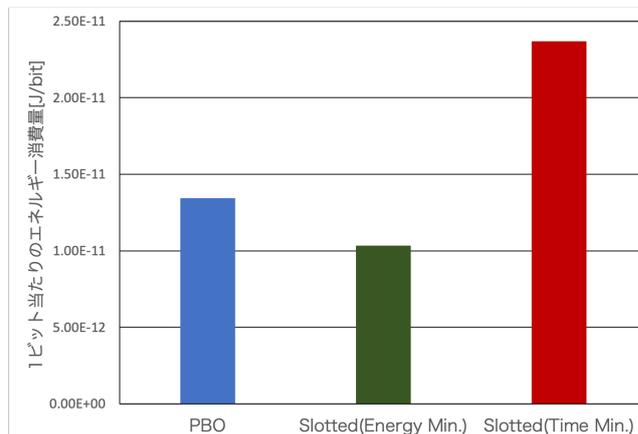


図5 slotted オフロードシステムの処理時間

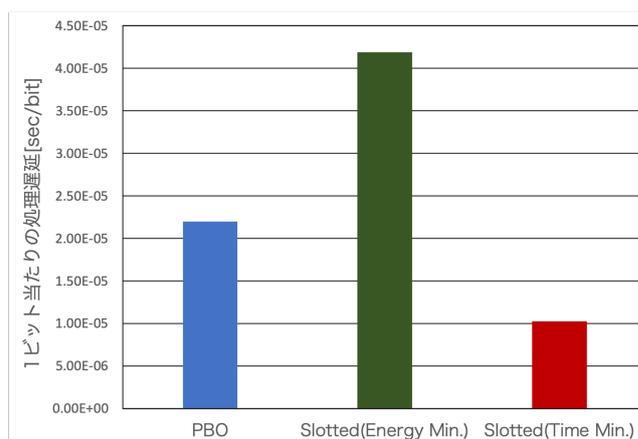
計算 ( $p_k = 0.0$ ) の場合は距離に依存せず一定であるが、全オフロードする ( $p_k = 1.0$ ) 場合は距離に対して単調増加することがわかる。また、今回のパラメータでは  $d_k = 32$  [m] 前後で全ローカル計算の場合を全オフロードする場合のエネルギー消費量が上回るようになっている。提案法を用いた場合は  $d_k = 32$  [m] 以下では全ローカル計算の場合よりも少ないエネルギー消費量で計算タスクを処理できている。また、 $d_k = 32$  [m] 以上では全オフロードの場合よりも少ないエネルギー消費量で計算タスクを処理できていることがわかる。

#### 4.2.2 理想的なスロット化オフロード方式との比較

提案方式の評価のために、タスク処理時間またはエネルギー消費量を逐次的に計算し、バイナリーモードを理想的に選択できるようにスロット化オフロード方式を用いた場合と比較した。このスロット化オフロード方式は、時間をタイムスロットで区切り、各スロット内で WD がタスクを生起した場合タスクの情報を AP に送信する。AP は各タスクのオフロードまたはローカル計算を行った場合の処理時間及びエネルギー消費量を計算する。ここで、各 WD がスケジューリングのために AP へ送るタスク情報の送信にはエネルギー消費がかからないものとする。計算結果に基づいて、処理時間が短いモードもしくはエネルギー消費量が小さいモードを WD に通知し、生起したスロットの次のスロットの開始時間に処理を開始する。ここで、AP は各 WD 間のチャンネル、端末の位置や性能に関する情報を保持し



(a) 1 ビット当たりのエネルギー消費量の比較



(b) 1 ビット当たりの処理遅延の比較

図6 提案法と理想的なスロット化オフロード方式の比較

ていると仮定している。スロット化オフロード方式のタスクの処理時間  $T_{k,i}^s$  は、次式で表される。

$$T_{k,i}^s = T_{k,i} + \tau_s(s_{k,i} + 1) - \tau_0 \quad (15)$$

ここで、 $\tau_s$  はスロット長 [sec]、 $s_{k,i}$  はタスク生起したスロット、 $\tau_0$  はタスク生起した時間を表す。

オフロードは同時に実行できないため、生起した順番に 1 台ずつオフロードを実行するものとし、WD 内でローカル計算タスクを同スロット内で複数生起した場合、生起した順番に計算を実行するものとする。このスロット化オフロード方式の処理時間は図5で示される。

ここで、スロット長を  $\tau_s = 1.0$  [sec] とした時の比較を行う。提案法と、生起したタスクごとに 2 つのモードのエネルギー消費量を計算し理想的に小さいものを選択した場合、タスク処理時間を計算し理想的に小さいものを選択した場合を比較する。1 ビット当たりのエネルギー消費量及び 1 ビットあたりの処理時間を計算した結果、図6のようになった。結果より、提案法は理想的にエネルギー消費量を最小化した場合に比べて約 1.3 倍のエネルギー消費量がかかってしまうが、約 0.52 倍の処理遅延に抑えることができていることが示された。また、理想的にタスク処理時間を最小化した場合に比べて約 2.2 倍の処理遅延がかかってしまうが、約 0.57 倍のエネルギー消費量に抑えることが

できていることが示された。

## 5. まとめと今後の課題

本研究ではオフロードするかローカル計算するか2つのモードを確率的制御で選択する確率的バイナリーオフロードを提案した。シミュレーション結果より、提案手法を用いた場合はローカル計算のみで処理する場合、オフロードのみで処理する場合に比べてエネルギー消費量を抑えることができることが分かった。また、理想的にバイナリーモードを選択できるスロット化オフロード方式と比較して、提案法は自律分散型のシステムでありながら、エネルギー消費量と処理遅延を抑えられていることが確認できた。

本研究では全てのWDに対して均等にWPTを行っており、MECシステムと独立したものとなっている。今後は、オフロード確率に連携したWPTシステムと、APのオフロードタスクの受信数に基づくWPTシステムを検討する予定である。

謝辞 This work was supported by the European Commission in the framework of the H2020-EUJ-02-2018 project 5G-Enhance (Grant agreement no.815056) and the Ministry of Internal Affairs and Communications (MIC) of Japan.

## 文 献

- [1] A. A. Fuqaha, et al., "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 4th Quart., 2015.
- [2] Y. Mao, C. You, J. Zhang, K. Huang, K. B. Letaief, "A survey on mobile edge computing: The communication perspective," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 19, no. 4, pp. 2322–2358, Aug. 2017.
- [3] Y. Zeng, B. Clerckx, R. Zhang, "Communications and signals design for wireless power transmission," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 65, no. 5, pp. 2264–2290, May 2017.
- [4] W. Zhang, et. al., "Energy-Optimal Mobile Cloud Computing Under Stochastic Wireless Channel," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 9, pp. 4569–4581, Sep. 2013.
- [5] F. Wang, J. Xu, X. Wang, S. Cui, "Joint Offloading and Computing Optimization in Wireless Powered Mobile-Edge Computing Systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 3, pp. 1784–1797, Mar. 2018.
- [6] S. Bi, Y. J. Zhang, "Computation Rate Maximization for Wireless Powered Mobile-Edge Computing With Binary Computation Offloading," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 6, pp. 4177–4190, Jun. 2018.
- [7] A. F. Molisch, *Wireless Communications Second Edition*, United States of America: Wiley-IEEE Press, 2011.
- [8] B. Sklar, and F. J. Harris, *Digital Communications: Fundamentals and Applications*, Prentice-hall Englewood Cliffs, NJ, 1988.
- [9] C. E. SHANNON, "A Mathematical Theory of Communication," *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379–423, Jul., 1948.
- [10] Y. Wang, et al., "Mobile-Edge Computing: Partial Computation Offloading Using Dynamic Voltage Scaling," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 64, no. 10, pp. 4268–4282, Oct. 2016.