

Рис. 5. Зависимость дисперсии оценки координат от расстояния между объектами

объекта от расстояния между объектами ( $\delta$ ) и размеров дискрет ( $\Delta$ ). Видно, что по мере приближения объектов друг к другу качество оценивания падает, особенно это заметно при достаточно больших размерах дискрет регистрирующей аппаратуры. Итак, получена совместно-оптимальная процедура оценивания (10)–(13) параметров положения объектов в условиях редкой дискретизации пространства наблюдений (по группированной выборке), являющейся двумерным "оптимальным" аналогом эвристической одномерной процедуры [5], которая использует вместо локальных математических ожиданий случайных величин в дискрете значения медиан этих дискретов. Анализ элементов соответствующей матрицы Фишера и, в частности, приведенных графиков позволяет оценить потенциальную точность предлагаемых оценок, а также область их целесообразного

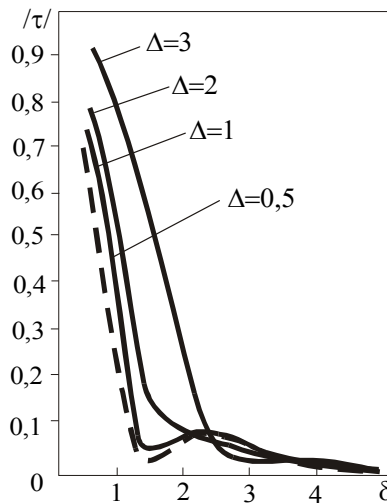


Рис. 6. Зависимость коэффициентов взаимной корреляции координат от расстояния между ними

использования в реальных информационных системах.

**Литература:** 1. Бодин Н.А. Оценка параметров распределения по группированным выборкам // Тр. ин-та им. Стеклова. Теоретические задачи математической статистики. 1970. № III. С. 110–150. 2. Закс Ш. Теория статистических выводов. М.: Мир, 1975. 776 с. 3. Демидович Б.П., Маррон И.А. Основы вычислительной математики. М.: Наука, 1970. 664 с. 4. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности: Справочное издание / Под ред. С.А. Айвазяна. М.: Финансы и статистика, 1989. 606 с. 5. Миленский А.В. Классификация сигналов в условиях неопределенности / М.: Сов. радио, 1975. 328 с.

Поступила в редколлегию 03.03.99

**Рецензент:** д-р техн. наук Поповский В.В

**Саваневич Вадим Евгеньевич**, канд. техн. наук, доцент Харьковского военного университета. Адрес: Украина, 310086, Харьков, ул. Тобольская, 38-а, кв.33, тел. 32-16-38.

УДК 662.396.67:621.314.6

## ВАРИАНТЫ АНАЛИЗА КПД СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ СВЧ ЛУЧОМ

ШОКАЛО В.М., РЫБАЛКО А.М., КОНОВАЛЬЦЕВ А.А.

Излагаются два варианта анализа КПД систем передачи энергии СВЧ-лучом (СПЭСЛ). Первый, более строгий, предполагает совместное рассмотрение процессов передачи, приема и выпрямления энергии в системе. Второй вариант допускает декомпозицию СПЭСЛ на автономные передающую и приемную подсистемы. Путем исследований доказывається практическая пригодность второго варианта анализа.

В настоящее время значительное внимание уделяется разработке систем передачи энергии с помощью СВЧ луча. Важнейшим требованием, предъявляемым к этим системам, является высокий результирующий КПД. Значение такого КПД во многом зависит, как показано в [1], от КПД перехвата и выпрямления. Последний, с учетом влияния нелинейных эффектов в ректенне (антенне-выпрямителе), определяется из соотношения

$$(1)$$

где  $P_{0\max}$  – суммарная мощность постоянного тока на выходах приемно-выпрямительных элементов

(ПВЭ) ректенны с апертурой радиуса  $r$ ;  $P_0$  – мощность излучения передающей антенны с апертурой радиуса  $R$ ;  $\eta$  – волновой коэффициент;  $\delta$  – расстояние между апертурами;  $\rho$  – амплитудное распределение по апертуре передающей антенны;  $J_0$  – функция Бесселя нулевого индекса;  $f$  – функция, описывающая нелинейную зависимость КПД выпрямления ПВЭ от плотности потока падающего поля;  $r$  – радиальная координата.

Однозначно вид функции  $f$  может быть определен только для ректенн, построенных из однотипных ПВЭ, соединенных с нагрузкой последовательной или параллельной схемой сбора и в приближении отсутствия побочного излучения. На практике возможно применение ректенн как с неоднотипными ПВЭ, так и с произвольной схемой сбора, для которых вид функции  $f$  определить весьма трудно. Поэтому имеет смысл найти более простой способ расчета КПД перехвата и выпрямления при допустимых потерях в точности вычислений.

С этой целью рассмотрим возможные пути упрощения записи функционала (1). Введем обозначение

$$(2)$$

где  $\eta_{\max}$  – КПД выпрямления при максимальном значении плотности потока мощности падающего на ректенну СВЧ пучка;  $\eta_0$  – нормированная функция, которая определяет зависимость КПД

выпрямления ПВЭ от плотности потока мощности и степени нелинейности его характеристики  $m$  и имеет следующие свойства:

- при  $\mu \rightarrow 0$ ;
- при  $\mu \rightarrow \infty$  (нелинейные эффекты в ректенне отсутствуют).

С учетом формулы (2) функционал (1) запишем следующим образом:

$$(3)$$

Полученное выражение (3) представляет собой нелинейный функционал, в числителе которого функция  $\eta$ , характеризующая эффективность выпрямления ректенны, и амплитудное распределение поля возбуждения  $\mu$  взаимосвязаны. Таким образом, при передаче энергии в СПЭСЛ сфокусированным лучом процессы приема и преобразования (перехвата и выпрямления) необходимо рассматривать совместно. В двух случаях эти процессы можно разделить - либо при равноамплитудном возбуждении ректенны, либо при линейной зависимости КПД ПВЭ от плотности потока мощности  $\mu$ .

В первом случае  $\mu = \mu_0$  и  $\eta = \eta(\mu_0)$ , где  $\mu_0$  - КПД выпрямления ректенны, равный КПД выпрямления одного ПВЭ. Тогда

$$(4)$$

В формуле (4) выражение для КПД перехвата полностью совпадает с результатом, приведенным в [2].

При  $\mu = \mu_0$  нелинейные эффекты в ректенне отсутствуют и функционал (3) запишется в следующем виде:

$$(5)$$

Из полученных выражений (4) и (5) следует, что в рассмотренных двух предельных случаях можно провести декомпозицию СПЭСЛ на передающую и приемную подсистемы и исследовать ректенну автономно.

Очевидно, что с определенной потерей точности ректенну можно исследовать как автономную подсистему и при наличии нелинейных эффектов  $\eta$ . Положительной стороной данного подхода является возможность описания ректенны несколькими макромоделями, позволяющими раздельно исследовать

КПД ректенны и характеристики ЭМС. Эти исследования могут быть проведены не только для простых ректенн, выполненных из однотипных ПВЭ, соединенных с нагрузкой последовательно или параллельно, но и для более сложных, апертура которых конструируется неоднотипными ПВЭ, а схема сбора имеет произвольную топологию.

Границы применимости рассмотренного подхода можно установить, сравнив результаты расчета КПД СПЭСЛ как системы, состоящей из автономных подсистем, с данными вычислений по функционалу (1), описывающему СПЭСЛ как целостную систему, при различных значениях  $\mu$ .

Такие исследования проведены для случая СПЭСЛ с крупноапертурной ректенной, ПВЭ которой располагались в узлах решетки с квадратной сеткой, шаг последней  $a = \lambda/2$  (  $\lambda$  - длина волны) на частоте 2,45 ГГц. В ПВЭ использовались полосковые полуволновые резонансные вибраторы, объединенные с однополупериодной схемой выпрямления на диоде Шоттки и идеальными фильтрами. Рассматривались три варианта ПВЭ с серийными диодами различных типов, отличающихся уровнем допустимой входной СВЧ мощности (таблица). Нелинейная зависимость КПД ПВЭ от плотности потока мощности задавалась известным соотношением [1]

где  $\mu_0$  - плотность потока мощности в центре ректенны. При этом считалось, что амплитудное распределение по апертуре передающей антенны оптимальное и изменяется по закону [1]

здесь  $\mu_0$  - волновой параметр.

КПД выпрямления ректенны вычислялся по формуле [3]

Для определения КПД перехвата использовался функционал (1) при  $\mu = \mu_0$ . Данные расчета произведения  $\eta \cdot \mu$  приведены в таблице. Здесь же для сравнения отражены результаты вычислений значений  $\eta$  по функционалу (1) и приведены относительные ошибки вычислений КПД в виде произведения парциальных КПД  $\eta_i \cdot \eta_r$  ( ).

Из приведенных данных можно сделать вывод, что подход к анализу СПЭСЛ как системы, состоящей из автономных приемной и передающей подсистем, вполне применим на практике, так как обеспечивает проведение расчетов КПД с небольшими

Вариант расчета	$P_p, Вт$	$\mu$	$\eta_i \cdot \eta_r$	$\bar{\eta}$	$\delta, \%$
1	0,2	0,142	0,752	0,714	5,32
2	0,5	0,121	0,818	0,781	4,73
3	1	0,053	0,906	0,887	2,14

ошибками при использовании в ректенне серийно выпускаемых диодов Шоттки.

**Литература:** 1. *Shokalo V.M., Rybalko A.M.* Optimization and analysis of efficiency of the system of power transmission through microwave beam // 2-nd Wireless Power Transmission Conference, Kobe, Japan. 1995. Abstract No. 3-8. 2. *Goubau G., Schwering F.* On the guided propagation of electro-magnetic wave beams // IRE Trans. Antennas Propagation. 1961. Vol. AP-9. P.248-256. 3. *Shifrin Y.S., Shokalo V.M., Konovaltsev A.A.* Ways of increase of rectenna efficiency // 46-th International Astronautical Congress, Oslo, Norway. 1995. Preprint IAF-95-R-4.04. 11p.

Поступила в редколлегию 30.03.99

**Рецензент:** д-р техн. наук Кашеев Б. Л.

УДК 621.396.6

## МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ИМПЕДАНСА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

ЛЕПИХ Я. И.

Предлагается метод изменения импеданса встречно-штыревых преобразователей поверхностных акустических волн (ПАВ) путем разделения его на секции с последующей их коммутацией по различным схемам. Метод позволяет в ряде случаев достичь оптимального согласования фильтров на ПАВ с радиотрактом.

При использовании фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ) в радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) часто возникает проблема оптимального согласования встречно-штыревых преобразователей (ВШП) с элементами схемы. Эта проблема особенно остро стоит для узкополосных фильтров со звукопроводами из сильных пьезоэлектриков, имеющих большой импеданс емкостного характера вследствие значительного количества пар штырей ВШП  $N$  и высокой диэлектрической проницаемости материала звукопровода  $\epsilon$ . Необходимыми условиями согласования являются: компенсация емкостной составляющей  $C_0$  ВШП и обеспечение равенства его активного сопротивления излучения  $R_a$  активному сопротивлению элементов схемы.

Решение этой проблемы расчетным путем на этапе проектирования фильтров [1] является довольно громоздким. Конструктивно же компенсация  $C_0$  обычно осуществляется включением параллельно

**Шокало Владимир Михайлович**, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры основ радиотехники ХТУРЭ. Научные интересы: системы беспроводной передачи энергии СВЧ-лучом, активные антенны, антенны с нелинейными элементами, ректенны. Адрес: Украина, 310726, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-94-78.

**Рыбалко Александр Митрофанович**, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры основ радиотехники ХТУРЭ. Научные интересы: системы беспроводной передачи энергии СВЧ лучом, ректенны, статистическая теория антенн. Адрес: Украина, 310726, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-94-30.

**Коновальцев Андрей Алексеевич**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры основ радиотехники ХТУРЭ. Научные интересы: системы беспроводной передачи энергии СВЧ лучом, антенны с нелинейными элементами, ректенны. Адрес: Украина, 310726, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-94-30.

или последовательно ВШП катушки индуктивности, что не соответствует требованиям миниатюризации РЭА. Согласование активных сопротивлений обеспечивается использованием преобразователей типа дифракционной решетки [2] либо при помощи трансформаторов [3]. Однако и тот и другой варианты решений не являются достаточно эффективными, поскольку усложняют конструкцию фильтра. В [4] в целях увеличения  $R_a$  и уменьшения  $C_0$  использовано прореживание ВШП путем исключения некоторого количества штырей. Но в этом случае достижение желаемого результата приводит к снижению эффективности преобразования, и для материалов звукопровода с малыми величинами коэффициента электромеханической связи  $K_p^2$  является неприемлемым.

Нами исследована возможность изменения импеданса ВШП путем разделения его на секции и последующей их коммутации в различных комбинациях.

Необходимыми условиями для построения секционированных ВШП являются:

а) равенство сопротивлений (проводимостей) излучения и емкостей секций, т. е.

$$R_{a1} = R_{a2} = \dots R_{am}, \\ C_1 = C_2 = \dots C_m;$$

б) при равенстве ширины штырей и промежутков между ними расстояние между секциями должно быть равно расстоянию между штырями, что соответствует  $\lambda_0/4$ , где  $\lambda_0$  – длина волны на частоте акустического синхронизма  $\omega_0$ ;

в) минимальное число штырей в секции  $N' = 2$ .

Емкость несекционированного ВШП определяется по формуле

$$C_0 = C_n \cdot N \cdot W,$$

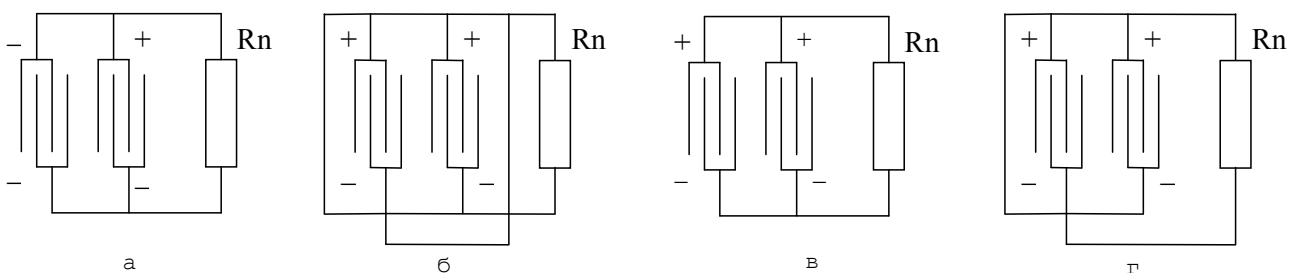


Рис. 1. Варианты коммутации секций ВШП