

# РАДИОЕЛЕКТРОНИКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

# РАДИОЕЛЕКТРОНИКА ТА ТЕЛЕКОММУНІКАЦІЇ

# RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.396.96

Савочкин Д. А.<sup>1</sup>, Гимпилевич Ю. Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Аспирант кафедри радіотехніки і телекомунікацій Севастопольського національного технічного університету, Севастополь, Україна

<sup>2</sup>Д-р техн. наук, професор, завідує кафедрою радіотехніки і телекомунікацій Севастопольського національного технічного університету, Севастополь, Україна

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ АНТЕНН ДЛЯ СИСТЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДВУМЕРНОЙ RFID-ЛОКАЛИЗАЦИИ

Разработана методика поиска оптимального размещения антенн для систем пространственной локализации на основе технологии радиочастотной идентификации (RFID). Методика основана на минимизации средней ошибки при реализации комбинированного метода локализации, включающего в себя алгоритм трилатерации, алгоритм отпечатков и алгоритм пересечений. В ходе проведенного вычислительного эксперимента установлено, что среди ряда рассмотренных паттернов оптимальным для квадратной зоны локализации является вариант размещения антенн в виде квадратной сетки при ориентации зон действия антенн по направлению к центру зоны локализации.

**Ключевые слова:** RFID, локализация, оптимизация, комбинированный метод, размещение антенн.

### НОМЕНКЛАТУРА

HDOP – horizontal dilution of precision;

RFID – radio frequency identification;

$a$  – вектор размещения антенн;

$A$  – множество векторов  $a$ ;

$b$  – отношение длин большой и малой осей эллипсов

зон действия антенн;

$c(a, l)$  – коэффициент покрытия точки  $l$  зонами действия антенн при размещении антенн согласно вектору  $a$ ;

$C(a)$  – коэффициент покрытия зоны локализации зонами действия антенн;

$\overline{C(a)}$  – нормированный коэффициент покрытия зоны локализации зонами действия антенн;

$C_{\max}$  – граница нормирования коэффициента покрытия зоны локализации;

$c_1(a)$  – отношение площади той части зоны локализации, что покрыта зонами действия хотя бы одной антенны, к общей площади зоны локализации;

$c'_1(a)$  – отношение площади той части центральной области зоны локализации, что покрыта зонами действия хотя бы одной антенны, к общей площади центральной области зоны локализации;

$c_3(a)$  – отношение площади той части зоны локализации, что покрыта зонами действия трех или более ан-

тенн, к общей площади зоны локализации при размещении антенн согласно вектору  $a$ ;

$d$  – расстояние между RFID-меткой и антенной;

$e(a, l)$  – ошибка локализации для точки  $l$ , обеспечиваемая алгоритмом пересечений при размещении антенн согласно вектору  $a$ ;

$E(a)$  – средняя ошибка локализации, обеспечиваемая алгоритмом пересечений;

$\overline{E(a)}$  – нормированная средняя ошибка локализации, обеспечиваемая алгоритмом пересечений;

$E_{\max}$  – граница нормирования средней ошибки алгоритма пересечений;

$h(a, l)$  – величина HDOP для точки  $l$  при размещении антенн согласно вектору  $a$ ;

$H(a)$  – усредненная величина HDOP;

$\overline{H(a)}$  – нормированная усредненная величина HDOP;

$H_{\max}$  – граница нормирования величины HDOP;

$k(\varphi)$  – поправочный эллиптический коэффициент для азимута  $\varphi$  на точку размещения метки относительно точки размещения соответствующей антенны;

$l$  – некоторая точка в пространстве зоны локализации;

$\hat{l}(a, l)$  – оценка местоположения метки, формируемая алгоритмом пересечений при ее расположении в точке  $l$ ;

$\hat{l}(a, q, l)$  – оценка местоположения метки, формируемая алгоритмом пересечений при ее расположении в точке  $l$  в случае принятия ответов только антеннами множества  $q$  и размещения антенн согласно вектору  $a$ ;

$L$  – множество точек зоны локализации;

$|L|$  – площадь зоны локализации;

$L_3(a)$  – множество точек той части зоны локализации, которая покрыта зонами действия как минимум трех различных антенн;

$|L_3(a)|$  – площадь той части зоны локализации, которая покрыта зонами действия как минимум трех различных антенн при размещении антенн согласно вектору  $a$ ;

$N$  – общее число антенн RFID-системы;

$p(d)$  – вероятность получения антенной ответа от метки, расположенной на расстоянии  $d$ ;

$p(d, \Phi)$  – вероятность получения антенной ответа от метки, расположенной на расстоянии  $d$  с азимутом  $\Phi$ ;

$\bar{p}(d, \Phi)$  – вероятность неполучения антенной ответа от метки, расположенной на расстоянии  $d$  с азимутом  $\Phi$ ;

$q$  – некоторое множество номеров антенн;

$q_{all}$  – множество номеров всех антенн системы;

$Q$  – множество всех возможных множеств номеров антенн, принявших сигналы от метки;

$r(l_1, l_2)$  – функция расстояния между точками  $l_1$  и  $l_2$ ;

$R_{max}$  – предельное расстояние между антенной и меткой, после которого вероятность получения ответа от метки антенной равна нулю;

$R_{min}$  – предельное расстояние между антенной и меткой, до которого вероятность получения ответа от метки антенной равна единице;

$S(a)$  – целевая функция оптимизации размещения антенн при реализации комбинированного метода пространственной локализации;

$v(a, q, l)$  – вероятность получения ответов от метки расположенной в точке  $l$  только антеннами множества  $q$  и размещения антенн согласно вектору  $a$ ;

$w(a, l)$  – вероятность размещения метки в точке  $l$ ;

$w_{opt}(a)$  – весовой коэффициент алгоритма отпечатков;

$w_{пер}(a)$  – весовой коэффициент алгоритма пересечений;

$w_{трпл}(a)$  – весовой коэффициент алгоритма трилатерации;

$z$  – величина сдвига антенн относительно края зоны локализации;

$\alpha(a, l)$  – геометрическая матрица, используемая при вычислении величины HDOP;

$\beta(a, l)$  – ковариационная матрица, используемая при вычислении величины HDOP;

$\Phi(l, a_i)$  – азимут на точку  $l$  относительно точки размещения антенны  $a_i$ ;

$\Psi$  – угол поворота эллипсов зон действия антенн.

## ВВЕДЕНИЕ

Системы пространственной локализации объектов внутри закрытых помещений находят широкое применение в различных сферах человеческой деятельности.

Одной из перспективных технологий, позволяющих реализовать процедуру пространственной локализации, является технология радиочастотной идентификации

RFID. В системах RFID-локализации используются специальные RFID-метки, размещаемые на объектах. Местоположение объектов определяется в ходе выполнения алгоритма локализации, который анализирует измерительную информацию, получаемую от меток с помощью нескольких антенн RFID-системы. Важной задачей при этом является повышение точности локализации объектов. Одним из факторов, оказывающих влияние на точность локализации, является размещение антенн в пространстве.

Целью настоящей работы является разработка методики оптимизации размещения антенн RFID-системы для комбинированного метода двумерной пространственной локализации, включающего в себя несколько различных алгоритмов локализации.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе мы рассматриваем случай двумерной локализации, когда интересующие нас объекты оснащены RFID-метками и находятся на полу помещения (или на небольшой высоте над уровнем пола), а антенны системы установлены на потолке. Положим, что система содержит определенное количество практически одинаковых антенн, которые должны быть оптимальным образом размещены (заданы их координаты и углы поворота). В качестве критерия оптимальности мы принимаем критерий минимума средней ошибки локализации при реализации комбинированного метода локализации.

Исходными данными для разрабатываемой нами методики являются размер зоны локализации (области в которой могут размещаться объекты локализации с RFID-метками), число антенн RFID-системы, их параметры, а также множество анализируемых векторов размещения антенн. При этом под параметрами антенн мы понимаем в первую очередь форму и размер зон действия антенн – областей, при расположении в которых RFID-меток, их сигналы успешно принимаются антеннами. В качестве выходных данных наша методика должна выдавать значения целевой функции для каждого анализируемого вектора размещения антенн, тем самым позволяя выбрать наилучший вариант.

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В литературе имеется ряд работ, посвященных теме оптимального размещения антенн в пространстве. При этом используется множество различных критериев оптимальности. Так, в [1] представлена методика поиска наилучшего размещения точек доступа в беспроводных сетях. Авторы добиваются максимизации покрытия рабочей области зонами действия антенн, минимизации интерференции между точками доступа, максимизации пропускной способности, а также минимизации числа точек доступа. В [2] помимо максимизации покрытия рабочей области и минимизации общего числа точек доступа авторы добиваются минимизации средних потерь в распространении сигналов. В [3] рассмотрен вопрос оптимального размещения антенн в классической RFID-системе (не обеспечивающей локализацию объектов). В данной работе авторы добиваются минимизации площади областей, в которых пересекаются зоны действия нескольких антенн, минимизации числа «беспо-

лезных» антенн (антенн, внутри областей действия которых не расположены RFID-метки), максимизации числа меток, находящихся внутри зон действия антенн, а также минимизации числа меток, находящихся внутри областей пересечения зон действия антенн.

Известны также работы, посвященные оптимизации размещения антенн при решении задачи локализации объектов в пространстве. В [4] проводится максимизация усредненного отношения величины разрешающей способности к степени изменчивости сигнала во времени. Недостатком данного критерия является необходимость наличия тренировочных (калибровочных) данных. В [5] выполняется минимизация размеров всех образуемых в рабочей области зон неопределенности. При этом под зоной неопределенности понимается такая область, которая образуется путем пересечения двух или более колец с центрами в точках размещения антенн и радиусами, соответствующими минимальным и максимальным дальностям действия антенн. Недостатком этого критерия можно считать его относительно высокую вычислительную сложность. В работе [6] предлагается для максимизации точности локализации добиваться того, чтобы каждая точка зоны локализации была покрыта зонами действия как минимум трех антенн, и при этом минимизировать общее число антенн системы. В [7] авторы стремятся минимизировать среднюю ошибку локализации, используя вероятностную модель распределения измерительной информации в виде уровней сигнала. Недостатком представленного подхода является требование наличия предварительно полученных данных, позволяющих выбрать параметры вероятностной модели.

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей работе проводится разработка методики оптимизации размещения антенн RFID-системы для комбинированного метода пространственной локализации. Комбинированный метод основан на объединении нескольких базовых алгоритмов локализации, что позволяет увеличить результирующую точность [8]. В простейшем случае результирующей оценкой местоположения RFID-метки в ходе реализации комбинированного метода считается среднее арифметическое оценок, сформированных базовыми алгоритмами. В этом разделе приводится описание трех базовых алгоритмов: алгоритма трилатерации, алгоритма отпечатков и алгоритма пересечений. Эти алгоритмы входят в состав комбинированного метода локализации, рассматриваемого в дальнейшей работе.

В ходе реализации алгоритма трилатерации (дальномерного алгоритма) для локализуемой метки строятся окружности положения по результатам измерений [8]. Далее находится точка пересечения этих окружностей, которая принимается оценкой положения метки. Радиусы окружностей положения определяются значениями измерительной информации, полученной от метки с помощью антенн (например, уровнями мощности ответных сигналов от метки). Этот алгоритм иллюстрируется рис. 1, на котором изображен случай трилатерации метки с помощью трех антенн ( $a_1, a_2, a_3$  – позиции антенн,  $d_1, d_2, d_3$  – расстояния между антеннами и меткой, красн – результирующая оценка положения метки).

Алгоритм отпечатков требует проведения предварительного этапа сбора измерительной информации в различных точках зоны локализации от тренировочных RFID-меток. Собранные при этом измерительная информация используется как источник эталонных данных на рабочем этапе локализации. При реализации алгоритма для расчета оценки местоположения некоторой метки ее вектор измерительной информации (отпечаток) сравнивается с каждым вектором из сформированной на предварительном этапе базы отпечатков. В ходе сравнения в базе находятся векторы в максимальной степени подобные входному вектору. После этого результирующая оценка местоположения метки рассчитывается как среднее тех позиций, для которых были ранее получены найденные в базе векторы. Наиболее известным частным случаем алгоритма отпечатков является алгоритм  $k$  ближайших соседей ( $k$  nearest neighbors) [8].

Алгоритм пересечений основан на использовании измерительной информации в виде фактов наличия ответов от меток. При его реализации оценка местоположения некоторой RFID-метки рассчитывается путем нахождения области пересечения зон действия антенн, принявших сигналы от метки, с последующим исключением области объединения зон действия антенн, не принявших сигналы от метки [8]. С целью иллюстрации принципа работы алгоритма на рис. 2 изображена схема размещения четырех антенн ( $a_1, \dots, a_4$ ) и их зон действия (круги). При таком расположении антенн и размере зон действия формируется тринадцать областей возможного местоположения меток (зон позиционирования), центры масс которых могут быть приняты в виде результирующих оценок алгоритма.

Для создания методики оптимизации размещения антенн RFID-системы при использовании комбинированного метода пространственной локализации вначале необходимо сформировать факторы, характеризующие оп-

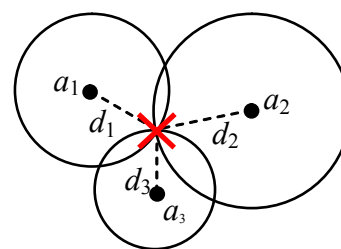


Рисунок 1 – Пример реализации алгоритма трилатерации

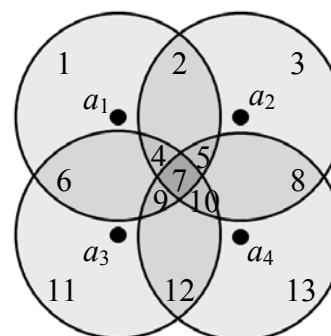


Рисунок 2 – Схема размещения четырех антенн и их зон действия

тимальность каждого из базовых алгоритмов, входящих в состав метода. В данном разделе мы поочередно проводим вывод таких факторов для алгоритмов трилатерации, отпечатков и пересечений, после чего формируем критерий оптимальности комбинированного метода.

В качестве фактора, характеризующего оптимальность размещения антенн при реализации алгоритма трилатерации, мы предлагаем использовать коэффициент горизонтального снижения точности (HDOP). Понятие HDOP широко применяется в теории систем спутниковой навигации для количественной оценки взаимного расположения спутников относительно приемного устройства. Усредненное значение HDOP  $H(a)$  можно вычислить путем взятия интеграла от величины HDOP по каждой из точек интересующей нас части зоны локализации:

$$H(a) = \int_{l \in L_3(a)} h(a, l) w(a, l) dl,$$

где  $a = \{a_1, \dots, a_N\}$  – каждый элемент вектора содержит позицию и угол поворота антенны;  $w(a, l)$  – вероятность размещения RFID-метки в точке  $l$  (позволяет выделить наиболее важные части зоны локализации [7]). В дальнейшей работе мы приняли плотность вероятности размещения меток равномерной:  $w(a, l) = 1/|L_3(a)|$ .

Мы проводим вычисление усредненного значения HDOP лишь по той части зоны локализации, которая покрыта зонами действия как минимум трех антенн, поскольку классический вариант алгоритма трилатерации для случая двумерной локализации требует получения измерительной информации от метки как минимум тремя различными антеннами. Мы полагаем, что в случае, когда ответы получены двумя или менее антеннами, результирующая оценка комбинированного метода формируется на основе оценок алгоритма отпечатков и алгоритма пересечений, а алгоритм трилатерации не используется.

Известно, что при вычислении значений HDOP для двумерного пространства первоначально формируется геометрическая матрица [9]

$$\alpha(a, l) = \begin{bmatrix} \frac{a_{1x} - l_x}{d_1} & \frac{a_{1y} - l_y}{d_1} \\ \frac{a_{2x} - l_x}{d_2} & \frac{a_{2y} - l_y}{d_2} \\ \frac{a_{3x} - l_x}{d_3} & \frac{a_{3y} - l_y}{d_3} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $a_1 = (a_{1x}, a_{1y})$ ,  $a_2 = (a_{2x}, a_{2y})$ ,  $a_3 = (a_{3x}, a_{3y})$  – позиции трех ближайших к точке  $l = (l_x, l_y)$  антенн;  $d_1, d_2, d_3$  – расстояния от точки  $l$  до антенн  $a_1, a_2, a_3$ , соответственно.

После этого вычисляется ковариационная матрица

$$\beta(a, l) = [\alpha(a, l)^T \alpha(a, l)]^{-1}, \quad (3)$$

где  $(\cdot)^T$  – операция транспонирования;  $(\cdot)^{-1}$  – операция нахождения обратной матрицы.

Окончательно величина HDOP в точке  $l$  вычисляется как

$$h(a, l) = \sqrt{\beta(a, l)_{1,1} + \beta(a, l)_{2,2}}. \quad (4)$$

В качестве фактора, характеризующего оптимальность размещения антенн при реализации алгоритма отпечатков, будем использовать коэффициент  $C(a)$  покрытия зоны локализации зонами действия антенн. Такой коэффициент может определяться по формуле

$$C(a) = \int_{l \in L} c(a, l) w(l) dl, \quad (5)$$

где  $c(a, l)$  – определяется как число зон действия, внутри которых находится точка  $l$ ;  $w(l) = 1/|L|$  – вероятность размещения RFID-метки в точке  $l$ .

В качестве фактора, характеризующего оптимальность размещения антенн при реализации алгоритма пересечений, примем среднюю ошибку  $E(a)$  пространственной локализации, обеспечиваемую алгоритмом. Ошибку  $E(a)$  можно записать в виде взвешенного интеграла ошибки локализации по каждой из точек зоны локализации:

$$E(a) = \int_{l \in L} e(a, l) w(l) dl. \quad (6)$$

Ошибка  $e(a, l)$  локализации для точки  $l$  определяется как расстояние между точкой  $l$  и оценкой  $\hat{l}(a, l)$  местоположения RFID-метки, формируемой алгоритмом пересечений при расположении метки в точке  $l$

$$e(a, l) = r[l, \hat{l}(a, l)] = \sqrt{[l_x - \hat{l}(a, l)_x]^2 + [l_y - \hat{l}(a, l)_y]^2}. \quad (7)$$

В идеализированном случае при реализации алгоритма пересечений оценка  $\hat{l}(a, l)$  положения метки формируется в центре масс той единственной зоны позиционирования, которая включает в себя точку  $l$ . Однако из-за различного рода шумов могут возникать ситуации отсутствия ответа от метки при ее расположении внутри зоны действия антенны или наличия ответа при расположении вне зоны действия. Это приводит к возможному смещению оценки местоположения. Учесть подобный эффект можно, реализуя вероятностное вычисление ошибки  $e(a, l)$ . Для этого нами предлагается учитывать вероятность  $p(d)$  получения антенной ответа от метки, расположенной на расстоянии  $d$ . Можно предположить, что до некоторого предела  $R_{\min}$  такая вероятность близка к единице, а далее она монотонно убывает и достигает нуля на расстоянии  $R_{\max}$ :

$$p(d) = \begin{cases} 1, & \text{если } d < R_{\min}; \\ 1 - \frac{d - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}}, & \text{если } R_{\min} \leq d \leq R_{\max}; \\ 0 & \text{если } d > R_{\max}. \end{cases} \quad (8)$$

Выражение (8) справедливо для антенн с изотропной в плоскости локализации диаграммой направленности, формирующих круговые зоны действия. Однако в RFID-системах часто применяются слабонаправленные антенны, при использовании которых форма зон действия принимает эллиптический характер. С целью учета это-

го мы предлагаем рассчитывать значения  $R_{\min}$  и  $R_{\max}$  с использованием поправочных коэффициентов:

$$\begin{cases} R_{\min}(\varphi) = R_{\min}k(\varphi); \\ R_{\max}(\varphi) = R_{\max}k(\varphi). \end{cases} \quad (9)$$

Эллиптический коэффициент  $k(\varphi)$  может быть рассчитан по следующей формуле (выводится из общей формулы эллипса в полярных координатах):

$$k(\varphi) = \frac{b\sqrt{2}}{\sqrt{(1-b^2)\cos(2\varphi-2\psi)+b^2+1}}. \quad (10)$$

Таким образом, выражение (8) может быть переписано для расчета вероятности  $p(d, \varphi)$  получения антенной ответа от метки, расположенной на расстоянии  $d$  с азимутом  $\varphi$ :

$$p(d, \varphi) = \begin{cases} 1, & \text{если } d < R_{\min}(\varphi); \\ 1 - \frac{d - R_{\min}(\varphi)}{R_{\max}(\varphi) - R_{\min}(\varphi)}, & \text{если } R_{\min}(\varphi) \leq d \leq R_{\max}(\varphi); \\ 0 & \text{если } d > R_{\max}(\varphi). \end{cases} \quad (11)$$

При этом вероятность неполучения антенной ответа от метки будем определять как

$$\bar{p}(d, \varphi) = 1 - p(d, \varphi). \quad (12)$$

С учетом всего вышесказанного, ошибку  $e(a, l)$  локализации для точки  $l$  следует определять как среднее взвешенное расстояний между точкой  $l$  и всеми возможными оценками местоположения метки при ее расположении в точке  $l$ . Весовыми коэффициентами усреднения при этом должны служить вероятности формирования конкретных оценок:

$$e(a, l) = \sum_{q \in Q} r[l, \hat{l}(a, q, l)]v(a, q, l). \quad (13)$$

Вероятность  $v(a, q, l)$  будем определять по формуле

$$v(a, q, l) = \prod_{i \in q} p[r(l, a_i), \varphi(l, a_i)] \prod_{j \in q_{all} \setminus q} \bar{p}[r(l, a_j), \varphi(l, a_j)], \quad (14)$$

где  $a_i, a_j$  – позиции  $i$ -й и  $j$ -й антенн, соответственно  $q_{all} = \{1, \dots, N\}$ .

Сформировав факторы, характеризующие оптимальность размещения антенн, для всех базовых алгоритмов локализации, мы можем вывести критерий оптимальности для комбинированного метода локализации. При этом целевая функция  $S(a)$  оптимизации размещения антенн комбинированного метода должна вычисляться на основе факторов (1), (5) и (6). Критерием оптимальности будем считать максимум целевой функции

$$S(a) \rightarrow \max_{a \in A}. \quad (15)$$

Определять целевую функцию  $S(a)$  будем в следующем виде:

$$S(a) = c'_1(a)^2 c_1(a)^3 [w_{\text{трил}}(a)\overline{H(a)} + w_{\text{отп}}(a)\overline{C(a)} + w_{\text{пер}}(a)\overline{E(a)}], \quad (16)$$

где в качестве центральной области понимался квадрат площадью 80% от площади всей зоны локализации, размещенный в ее центре.

В выражении (16) множители  $c'_1(a)$  и  $c_1(a)$  возводятся во вторую и третью степени, соответственно, поскольку мы полагаем, что важно иметь полное покрытие всей зоны локализации (и особенно важно – ее центральной части) зонами действия хотя бы одной из имеющихся антенн. Возведение величин  $c'_1(a)$  и  $c_1(a)$  в степень позволяет существенно снизить значение целевой функции для тех вариантов размещения антенн, при которых не вся зона локализации покрыта зонами действия антенн. Этим достигается исключение таких вариантов в ходе процедуры оптимизации, даже если они обеспечивают высокую точность локализации в других частях зоны локализации.

Весовые коэффициенты  $w_{\text{трил}}(a)$ ,  $w_{\text{отп}}(a)$ ,  $w_{\text{пер}}(a)$  позволяют учесть степень точности алгоритмов трилатерации, отпечатков и пересечений, соответственно. В настоящей работе мы задали их следующим образом:

$$\begin{cases} w_{\text{трил}}(a) = \frac{1}{3}c_3(a); \\ w_{\text{отп}}(a) = w_{\text{пер}}(a) = \frac{1}{3}\left[1 + \frac{1-c_3(a)}{2}\right]. \end{cases} \quad (17)$$

Такой вариант задания весовых коэффициентов используется по причине того, что предполагается, что алгоритм трилатерации функционирует только в той части зоны локализации, которая покрыта зонами действия хотя бы трех антенн.

Нормированная величина HDOP  $\overline{H(a)}$  определяется как

$$\overline{H(a)} = \begin{cases} 1 - \frac{H(a)-1}{H_{\max}-1}, & \text{если } H(a) \leq H_{\max}; \\ 0, & \text{если } H(a) > H_{\max}. \end{cases} \quad (18)$$

В настоящей работе мы приняли  $H_{\max} = 2,5$  (субъективная граница между «хорошими» и «средними» значениями).

Нормированный коэффициент покрытия зоны локализации зонами действия антенн  $\overline{C(a)}$  определяется как

$$\overline{C(a)} = \begin{cases} 1 - \frac{C_{\max} - C(a)}{C_{\max}}, & \text{если } C(a) \leq C_{\max}; \\ 1, & \text{если } C(a) > C_{\max}. \end{cases} \quad (19)$$

В настоящей работе мы эмпирически выбрали  $C_{\max} = 4$ , поскольку ответов от четырех антенн обычно достаточно для высокоточной локализации при использовании метода отпечатков.

Нормированная средняя ошибка  $\overline{E(a)}$  алгоритма пересечений определяется как

$$\overline{E(a)} = \begin{cases} 1 - \frac{E(a)}{E_{\max}}, & \text{если } E(a) \leq E_{\max}; \\ 0, & \text{если } E(a) > E_{\max}. \end{cases} \quad (20)$$

В данной работе для рассматриваемого далее размера зоны локализации и зон действия антенн мы эмпирически приняли  $E_{\max} = 0,6$  м.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

С целью поиска наилучшего размещения антенн RFID-системы мы провели вычисление величины целевой функции  $S(a)$  согласно выражению (16) для различных вариантов размещения 16 антенн. При этом мы рассматривали несколько простых паттернов размещения, представленных на рис. 3. Каждый вариант размещения антенн для каждого из паттернов также характеризовался некоторой величиной сдвига  $z$ .

В ходе исследований зона локализации была принята квадратной с размером  $5 \text{ м} \times 5 \text{ м}$ , а зоны действия антенн задавались в виде эллипсов с размерами малой оси  $R_{\min} = 1,6 \text{ м}$ ,  $R_{\max} = 1,9 \text{ м}$  (при отношении длины большой оси к длине малой, равном  $b = 1,5625$ ). Рассматривалось три варианта поворота антенн (и, соответственно, поворота их зон действия  $y$ ) относительно вертикальной оси: 1)  $45^\circ$ ; 2)  $90^\circ$ ; 3) поворот каждой антенны отдельно по направлению к центру зоны локализации. При этом для каждого паттерна размещения антенн мы рассчитывали величину целевой функции  $S(a)$  при изменении значения  $z$  от 0 м до 1,5 м с шагом в 5 см.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные нами результаты представлены на рис. 4 в виде зависимостей величины  $S(a)$  от значения  $z$ . Наилучшие для каждого паттерна варианты (один для случая поворота всех антенн в одном направлении и один для случая поворота всех антенн к центру зоны локализации) представлены на рис. 5 в виде схем.

#### 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим результирующие зависимости величины целевой функции  $S(a)$  от сдвига  $z$ , представленные на рис. 4. Видно, что согласно разработанному критерию наилучшим является вариант размещения антенн с использованием паттерна сетки при величине сдвига  $z = 85$  см, шаге сетки 110 см и повороте антенн по направлению к центру зоны локализации (рис. 5б). Полученное при этом значение целевой функции равно  $S(a) = 0,504$ . Важно отметить, что для всех вариантов рассмотренных паттернов (кроме паттерна треугольников) поворот антенн по направлению к центру зоны локализации позволил добиться увеличения величины целевой функции.

Наихудшие результаты, как и следовало ожидать, в основном были получены при использовании паттернов квадрата и окружности без размещения дополнительной антенны в центре, поскольку в этих случаях центральная часть зоны локализации остается не покрытой зонами действия антенн (рис. 5д–з). Также неудовлетворительные результаты получены для паттерна окружности с размещением дополнительной антенны в центре (рис. 5л). Это происходит из-за того, что, несмотря на внесение центральной антенны, при использовании такого паттерна для любых рассмотренных  $z$  в зоне локализации всегда остаются области, которые не покрыты зонами действия антенн (как в центре, так и по краям).

Проведенный в работе экспериментальный анализ не позволяет заявить о том, что полученное наилучшее размещение антенн является оптимальным не только среди рассмотренных, но и среди всех возможных размещений. Однако мы считаем, что разработанный критерий оптимальности адекватен и позволяет добиться минимальной средней ошибки локализации при использовании рассмотренного в работе комбинированного метода локализации.

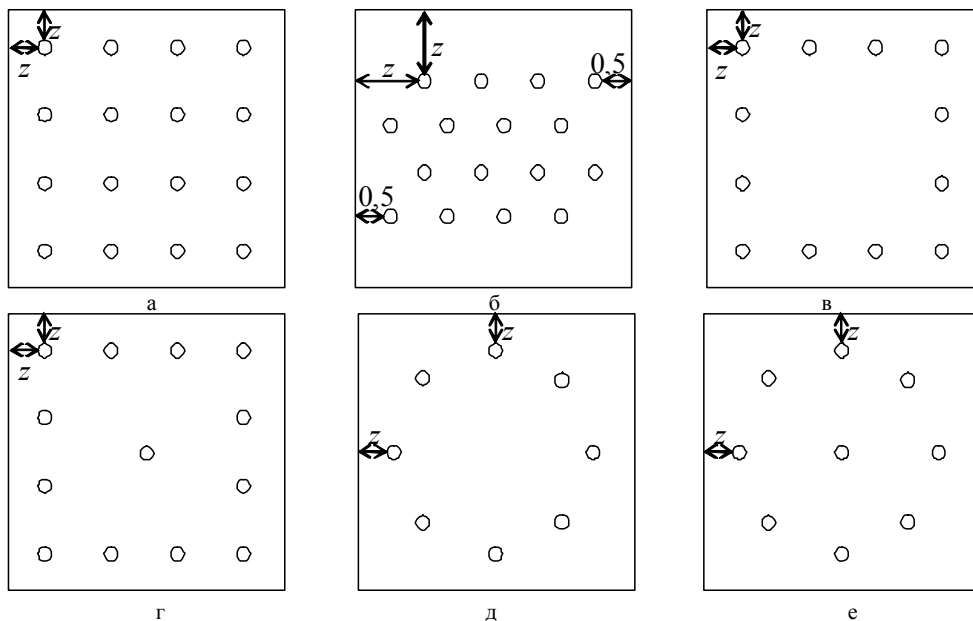


Рисунок 3 – Паттерны размещения антенн: а – сетка, б – треугольники, в – квадрат, г – квадрат с антенной в центре, д – окружность, е – окружность с антенной в центре

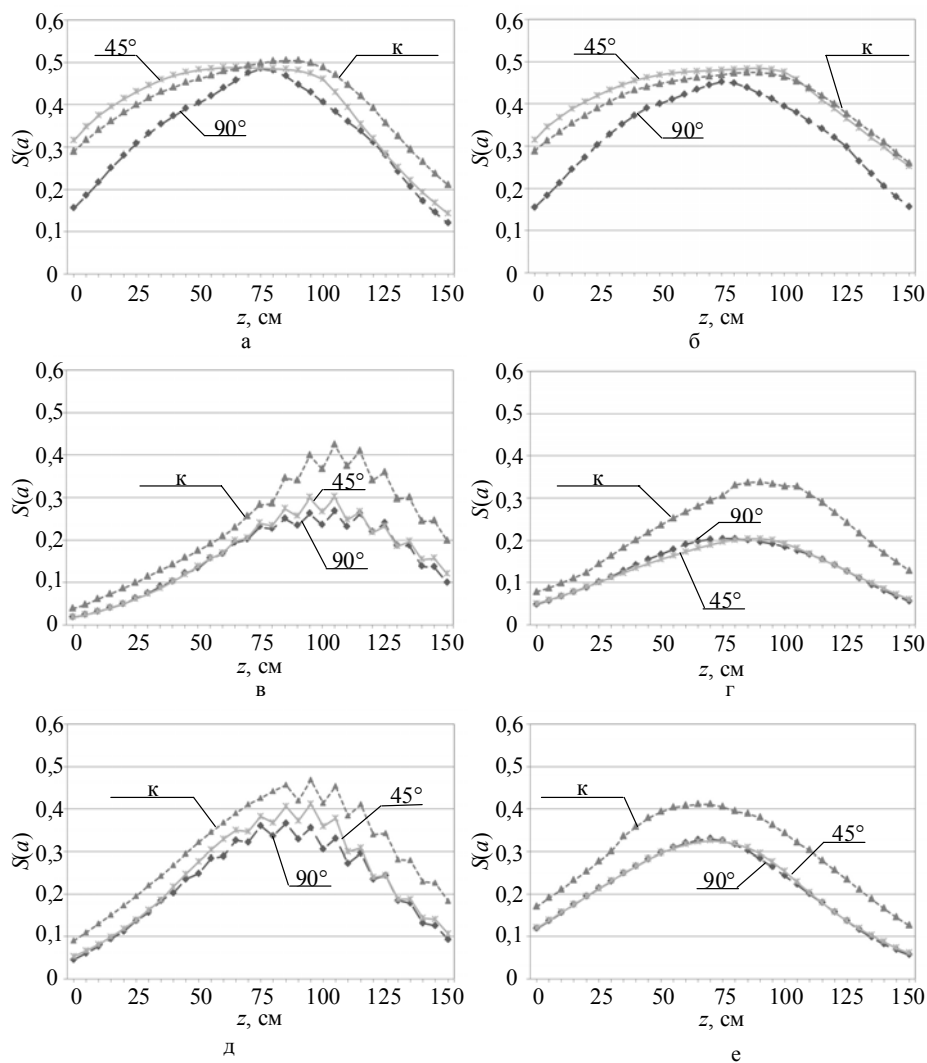


Рисунок 4 – Зависимости величины целевой функции  $S(a)$  от сдвига  $z$  при различных вариантах поворота зон действия антенн и для различных паттернов размещения антенн: а – сетка, б – треугольники, в – квадрат, г – окружность, д – квадрат с антенной в центре, е – окружность с антенной в центре

## ВЫВОДЫ

Разработана методика оптимизации размещения антенн для систем двумерной пространственной локализации RFID-меток при использовании комбинированного метода локализации. Используемый при этом критерий оптимальности основан на минимизации величины среднего HDOP, максимизации коэффициента покрытия зоны локализации зонами действия антенн и минимизации средней ошибки локализации алгоритма пересечений. В ходе экспериментальных исследований определено, что наилучшим среди рассмотренных паттернов размещения антенн является паттерн квадратной сетки при ориентации антенн по направлению к центру зоны локализации. В будущем планируется провести доработку методики с целью обеспечить возможность поиска оптимального размещения не только среди ряда заранее заданных паттернов, но и среди бесконечного множества нерегулярных вариантов размещения. Для этого планируется использовать эвристические алгоритмы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang C. S. Goal-programming-driven genetic algorithm model for wireless access point deployment optimization / C. S. Wang, C. T. Chang // *Mathematical problems in engineering*. – 2012. – Vol. 2012. – P. 1–14.
2. Tak S. Modeling and performance study of AP placement framework for indoor location-awareness and network performance / S. Tak, T. Kim, D. Kim, Y. Kim // *8th International conference on ubiquitous information management and communication*. Siem Reap, 9–11 January 2014 : proceedings. – Siem Reap, 2014. – P. 1–8.
3. Botero O. RFID network topology design based on Genetic Algorithms / O. Botero, H. Chaouchi // *2011 IEEE International conference on RFID-technologies and applications (RFID-TA)*. Sitges, 15–16 September 2011 : proceedings. – Sitges, 2011. – P. 300–305.
4. Fang S. H. A novel access point placement approach for WLAN-based location systems / S. H. Fang, T. N. Lin // *2010 IEEE Wireless communications and networking conference (WCNC)*, Sydney, 18–21 April 2010 : proceedings. – Sydney, 2010. – P. 1–4.
5. Ji Y. Optimal sniffers deployment on wireless indoor localization / Y. Ji, S. Biaz, S. Wu, B. Qi // *16th International conference on*

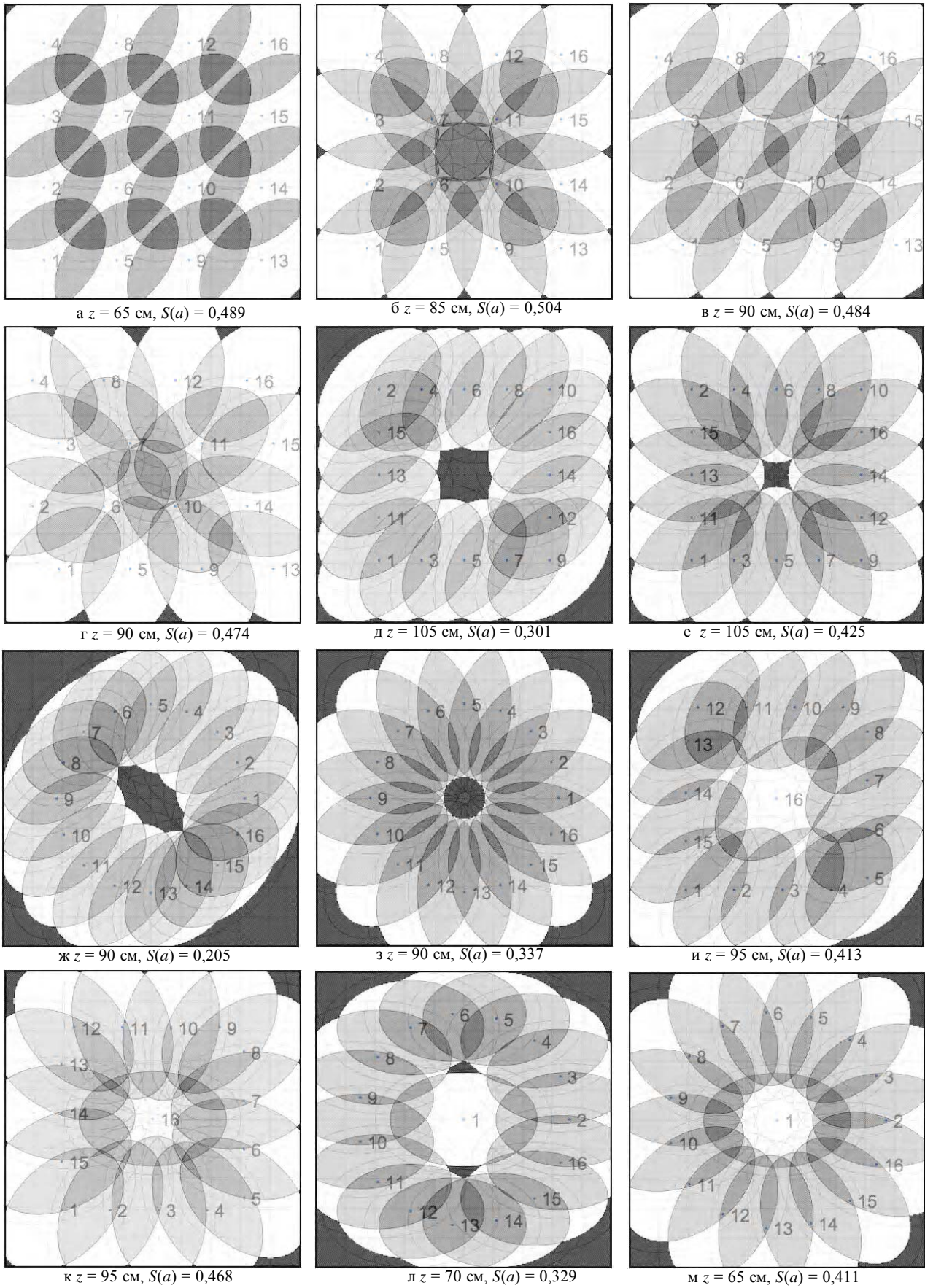


Рисунок 5 – Наилучшие варианты размещения антенн среди различных паттернов: а, б – сетка, в, г – треугольники, д, е – квадрат, ж, з – окружность, и, к – квадрат с антенной в центре, л, м – окружность с антенной в центре



- computer communications and networks, 2007. ICCCN 2007, Honolulu, 13–16 August 2007 : proceedings. – Honolulu, 2007. – P. 251–256.
- Farkas K. Optimization of Wi-Fi access point placement for indoor localization / K. Farkas, A. Huszak, G. Godor // *Informatics & IT today*. – 2013. – Vol. 1, No. 1. – P. 28–33.
  - Battiti R. Optimal wireless access point placement for location-dependent services / R. Battiti, M. Brunato, A. Delai // *Information engineering and computer science*. – 2003. – 12 p.
  - Savochkin D.A. Combinational RFID-based localization using different algorithms and measurements / D. A. Savochkin // *20th International conference on microwaves, radar, and wireless communications*. Gdansk, 16-18 June 2014 : proceedings. – Gdansk, 2014. – P. 238–243.
  - Levanon N. Lowest GDOP in 2-D scenarios / N. Levanon // *IEE Proceedings-radar, sonar and navigation*. – 2000. – Vol. 147, No. 3. – P. 149–155.

Статья поступила в редакцию 21.01.2015.

После доработки 02.02.2015.

Савочкін Д. О.<sup>1</sup>, Гімпілевич Ю. Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Аспірант кафедри радіотехніки та телекомунікацій Севастопольського національного технічного університету, Севастополь, Україна

<sup>2</sup>Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри радіотехніки та телекомунікацій Севастопольського національного технічного університету, Севастополь, Україна

#### ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІЩЕННЯ АНТЕН ДЛЯ СИСТЕМ ПРОСТОРОВОЇ ДВОВИМІРНОЇ RFID-ЛОКАЛІЗАЦІЇ

Розроблено методику пошуку оптимального розміщення антен для систем просторової локалізації на основі технології радіочастотної ідентифікації (RFID). Методика заснована на мінімізації середньої помилки при реалізації комбінованого методу локалізації, що включає в себе алгоритм трилатерації, алгоритм відбитків і алгоритм перетинів. У ході проведеного обчислювального експерименту встановлено, що серед низки розглянутих патернів оптимальним для квадратної зони локалізації є варіант розміщення антен у вигляді квадратної сітки при орієнтації зон дії антен у напрямку до центру зони локалізації.

**Ключові слова:** RFID, локалізація, оптимізація, комбінований метод, розміщення антен.

Savochkin D. A.<sup>1</sup>, Gimpilevich Yu. B.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Post-graduate student of Department of Radioelectronics and Telecommunications, Sevastopol National Technical University, Sevastopol, Ukraine

<sup>2</sup>Dr.Sc., Professor, Head of Department of Radioelectronics and Telecommunications, Sevastopol National Technical University, Sevastopol, Ukraine

#### OPTIMIZATION OF ANTENNA DEPLOYMENT FOR TWO-DIMENSIONAL RFID LOCALIZATION

This paper presents a method of search for the optimal antenna deployment for use in spatial localization systems based on the radio frequency identification technology (RFID). It involves minimizing the average error of a combinational localization method consisted of a trilateration algorithm, fingerprinting algorithm, and an intersectional algorithm. During the computational experiment we found the optimal solution among several antenna deployment patterns for a square localization field. The solution is a grid pattern with antenna interrogation zones oriented towards the field center.

**Keywords:** RFID, localization, optimization, combinational method, antenna deployment.

#### REFERENCES

- Wang C. S., Chang C. T. Goal-programming-driven genetic algorithm model for wireless access point deployment optimization, *Mathematical problems in engineering*, 2012, Vol. 2012, pp. 1–14.
- Tak S., Kim T., Kim D., Kim Y. Modeling and performance study of AP placement framework for indoor location-awareness and network performance, *8th International conference on ubiquitous information management and communication*. Siem Reap, 9–11 January 2014 : proceedings, Siem Reap, 2014, pp. 1–8.
- Botero O., Chaouchi H. RFID network topology design based on Genetic Algorithms, *2011 IEEE International conference on RFID-technologies and applications (RFID-TA)*. Sitges, 15–16 September 2011, proceedings, Sitges, 2011, pp. 300–305.
- Fang S. H., Lin T. N. A novel access point placement approach for WLAN-based location systems, *2010 IEEE Wireless communications and networking conference (WCNC)*. Sydney, 18–21 April 2010, proceedings, Sydney, 2010, pp. 1–4.
- Ji Y., Biaz S., Wu S., Qi B. Optimal sniffers deployment on wireless indoor localization, *16th International conference on computer communications and networks*. Honolulu, 2007, ICCCN 2007, 13–16 August 2007, proceedings, Honolulu, 2007, pp. 251–256.
- Farkas K., Huszak A., Godor G. Optimization of Wi-Fi access point placement for indoor localization, *Informatics & IT today*, 2013, Vol. 1, No. 1, pp. 28–33.
- Battiti R., Brunato M., Delai A. Optimal wireless access point placement for location-dependent services, *Information engineering and computer science*, 2003, 12 p.
- Savochkin D. A. Combinational RFID-based localization using different algorithms and measurements, *20th International conference on microwaves, radar, and wireless communications*. Gdansk, 16–18 June 2014, proceedings, Gdansk, 2014, pp. 238–243.
- Levanon N. Lowest GDOP in 2-D scenarios, *IEE Proceedings-radar, sonar and navigation*. 2000, Vol. 147, No. 3, pp. 149–155.