

ОПТИМИЗАЦИЯ МУЛЬТИЛАТЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ ВТОРИЧНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

В.Ф. Тележкин, Р.Б. Рюмин

OPTIMIZATION OF MULTILATERATION SECONDARY RADAR SYSTEMS

V.F. Teletzkin, R.B. Ryumin

Рассматривается проблема оптимизации для мультilaterационных систем вторичной радиолокации, определяются и анализируются основные оптимизируемые параметры. Приводятся результаты анализа алгоритмов мультilaterационной обработки, формулируются задачи дальнейшей работы.

Ключевые слова: радиолокация, мультilaterация, оптимизация, алгоритмы.

The article covers the optimization problem for multilateration secondary radar systems, the basic optimized parameters are determined and analyzed. The results of multilateration processing algorithms are provided; the further problems are enunciated.

Keywords: radiolocation, multilateration, optimization, algorithms.

Введение

В последние годы стремительно растет интенсивность грузовых и пассажирских авиаперевозок, возрастает загруженность авиатрасс, плотность воздушного движения. В связи с этим традиционные средства вторичной радиолокации, такие как моноимпульсный вторичный радиолокатор (МВРЛ), все менее соответствуют современным требованиям по точности и скорости определения местоположения летательного аппарата (ЛА) для более эффективного эшелонирования.

Кроме того, затраты на обслуживание МВРЛ очень высоки, не говоря уже о высокой цене самого вторичного радиолокатора.

В этих условиях стремительно развиваются системы вторичной радиолокации нового поколения, в том числе многопозиционные. К этому классу систем относится мультilaterационная система (MLAT).

Система MLAT представляет собой многопозиционную разностно-дальномерную РЛС. В состав системы входит ряд приемных станций, распределенных в обслуживаемой зоне обзора: любой сигнал, передаваемый бортовым ответчиком, принимается четырьмя или более станциями. Станции оборудованы логикой обнаружения прибытия сигнала и встроенным синхронизатором, к которому

привязано время обнаружения. Измеренное время прибытия сигнала посылается на центральный блок обработки наряду с другими данными, характеризующими сигнал. Оценка координат ответчика по четырем измерениям, позволяющим получить три измерения разности времени прибытия (TDOA), позволяет локализовать ответчик, даже если время излучения сигнала ответчиком неизвестно. Погрешность расположения ответчика определяется погрешностью определения TDOA и геометрическим фактором снижения точности (GDOP), обусловленным относительной позицией ответчика и приемных станций.

Также в состав системы входит контрольный ответчик, являющийся важным элементом системы синхронизации времени.

Таким образом, основными вопросами, стоящими перед разработчиками системы MLAT, являются:

- выбор конфигурации системы (расположение приемных станций и их количество), обеспечивающей приемлемую величину GDOP в заданной зоне действия системы;
- выбор технических средств, обеспечивающих требуемую точность измерения TDOA;
- выбор алгоритма вычисления местоположения.

Тележкин Владимир Федорович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехнических систем, Южно-Уральский государственный университет; tvf@rts.susu.ac.ru

Рюмин Роман Борисович – аспирант кафедры радиотехнических систем, Южно-Уральский государственный университет; romanryumin74@mail.ru

Teletzkin Vladimir Fedorovich – Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Radio Engineering Systems Department, South Ural State University; tvf@rts.susu.ac.ru

Ryumin Roman Borisovich – post-graduate student of Radio Engineering Systems Department, South Ural State University; romanryumin74@mail.ru

1. Постановка задачи

Система MLAT имеет ряд важных преимуществ по сравнению с МВРЛ: более высокая точность позиционирования, низкая стоимость изделия, низкая стоимость обслуживания, а самое главное – возможность адаптации системы к любым местностям, в частности, где невозможно или затруднено использование МВРЛ.

В ходе работы с использованием программного пакета MATLAB была создана математическая модель системы мультилатерации, с помощью которой можно исследовать различные алгоритмы позиционирования, в частности, приведенные в работах [1–6], а также всевозможные конфигурации системы.

Моделирование показало, что не существует алгоритма, который был бы лучше всех остальных на любых дальностях и высотах. Каждый алгоритм имеет сложную функцию зависимости точности от дальности и высоты, поэтому выбор алгоритма является одним из основополагающих вопросов при проектировании и оптимизации системы.

Число станций варьируется от 4 до 20 в зависимости от дальности, требуемой точности, чувствительности приемников.

Расположение станций зависит от рельефа местности, ориентации системы относительно воздушных трасс, а также от функций системы (обзор трассовой зоны, зоны подлета, зоны захода на посадку, обзор ВПП).

Особое значение имеет центральная станция, на которой происходит обработка радиолокационной информации (РЛИ). Необходимо оптимизировать расстояния между центральной станцией и остальными с целью минимизации затрат на аппаратуру передачи данных (АПД).

Большое влияние на точность позиционирования оказывает точность привязки времени системы к шкале времени UTC. Данная точность обеспечивается системой синхронизации времени, в состав которой входят ГЛОНАСС-приемники на каждой станции, а также контрольный ответчик. Моделирование показало, что координаты контрольного ответчика существенно влияют на погрешность синхронизации.

Таким образом, задача оптимизации мультилатерационной системы является задачей многокритериальной оптимизации и формулируется следующим образом: необходимо формализовать и составить весовую функцию с такими параметрами, как количество приемных станций n ; координаты приемных станций $(x_i, y_i, z_i), i = 1, \dots, n$; координаты центральной станции (x_0, y_0, z_0) ; координаты контрольного ответчика; характер зависимости абсолютной погрешности от дальности и высоты $\sigma(R, h)$ (зависит от выбранного алгоритма). Решением данной задачи является алгоритм оптимизации, позволяющий рассчитать параметры

системы при известном рельефе и требуемой дальности действия.

В данной работе приведен анализ различных конфигураций системы при фиксированных прочих параметрах.

2. Выбор алгоритма для моделирования

Для моделирования выбран классический алгоритм гиперболической радиолокации с первым приближением, подробно описанный в работе [4].

2.1. Расчетные формулы

Вычисление оценки координат производится по формуле:

$$\hat{R} = R_0 + c \left(F^T H^T N^{-1} H F \right)^{-1} F^T H^T N^{-1} \left(Ht - \frac{HD}{c} \right), \quad (2.1)$$

где R_0 – начальное приближение координат; F и H – конфигурационные матрицы вида:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} \frac{(R_0 - x_1)^T}{D_1} \\ \dots \\ \frac{(R_0 - x_n)^T}{D_n} \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

где $x_n = (x_i, y_i, z_i)$ – координаты станций; N – ковариационная матрица ошибок измерения:

$$N = H N_\epsilon H^T, \quad (2.3)$$

здесь N_ϵ – ковариационная матрица ошибок измерения ТОА, принимаем $N_\epsilon = I$; t – вектор времен прихода сигнала на каждую станцию; D – вектор расстояний от приемной станции до ЛА, рассчитанный на основе априорной оценки координат; c – скорость света.

R_0 может быть определено аналитически (алгоритм, предложенный в работе [5]).

Входными данными для алгоритма являются: конфигурация системы, ковариационная матрица ошибок измерения ТОА, разновременности прихода сигнала на каждую станцию, априорная оценка координат.

2.2. Порядок вычислений:

1. Определение первого приближения R_0
2. Вычисление расстояний от приемных станций до ЛА:

$$D_i = \sqrt{(X - x_i)^2 + (Y - y_i)^2 + (Z - z_i)^2}, \quad (2.4)$$

3. Расчет матрицы F по формуле (2.2).
4. Вычисление матрицы N по формуле (2.3).
5. Вычисление оценки местоположения по формуле (2.1).

3. Выбор конфигураций для моделирования

Для имитационного моделирования выбраны следующие конфигурации системы (все они применяются на практике в различных странах мира).

Координаты станций (м):

3.1

	x_i	y_i	z_i
1	-20000	-20000	15
2	-10000	-10000	15
3	0	0	15
4	10000	10000	15
5	20000	20000	15

3.2

	x_i	y_i	z_i
1	0	0	15
2	0	20000	15
3	20000	-20000	15
4	0	-20000	15
5	-20000	-20000	15

3.3

	x_i	y_i	z_i
1	0	0	15
2	20000	20000	15
3	20000	-20000	15
4	-20000	-20000	15
5	-20000	20000	15

3.4

	x_i	y_i	z_i
1	-20000	0	15
2	20000	20000	15
3	20000	-20000	15
4	-20000	-20000	15
5	-20000	20000	15

4. Имитационное моделирование

Моделирование производится в среде MATLAB. Параметры моделирования: высота полета ЛА – 6000 м, алгоритм с первым приближением, конфигурации системы описаны в п. 3, радиус зоны обзора – 200 км. Результатом моделирования являются зоны равной точности (изолинии, ограничивающие зоны с одинаковой абсолютной погрешностью местоположения, выраженной в метрах) (рис. 1–8).

5. Анализ результатов моделирования

В результате моделирования получены результаты, определяемые особенностями конфигурации системы.

В целом моделирование позволяет сделать вывод о том, что система мультilaterации имеет весьма гибкую структуру и может быть сконфигурирована в соответствии с конкретными требованиями (рельеф, характер решаемой задачи, расположение воздушных трасс). Например, видно, что наиболее равномерные зоны равной точности образует конфигурация, описанная в п. 3.3. Это позволяет говорить о том, что такая конфигурация системы является универсальной и применимой для большинства практических задач.

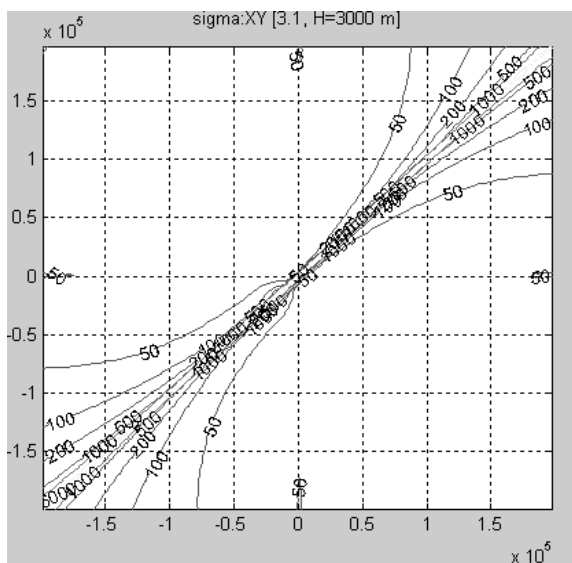


Рис. 1. Абсолютная погрешность определения плоскостных координат (конфигурация 3.1)

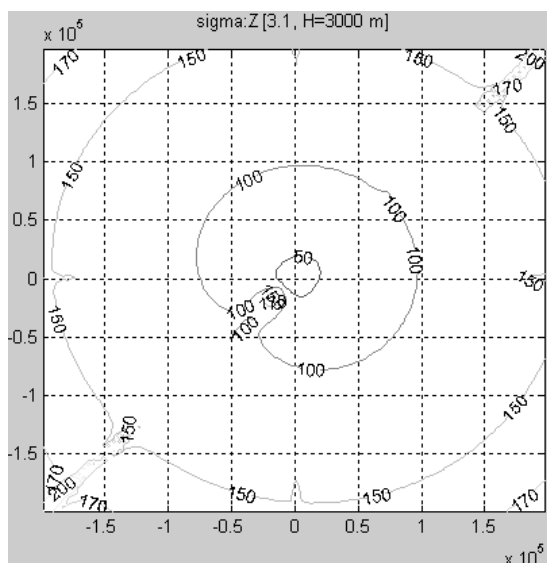


Рис. 2. Абсолютная погрешность определения высоты (конфигурация 3.1)

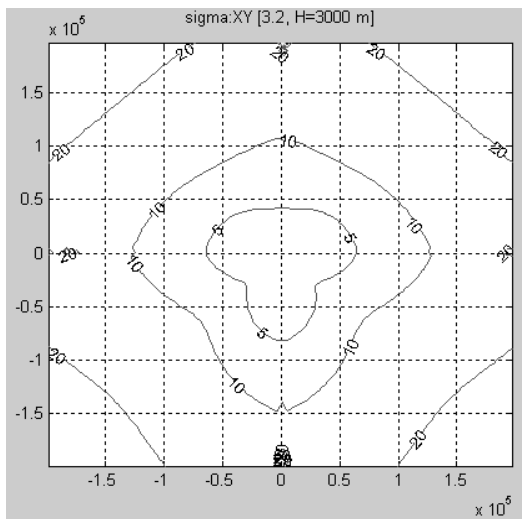


Рис. 3. Абсолютная погрешность определения плоскостных координат (конфигурация 3.2)

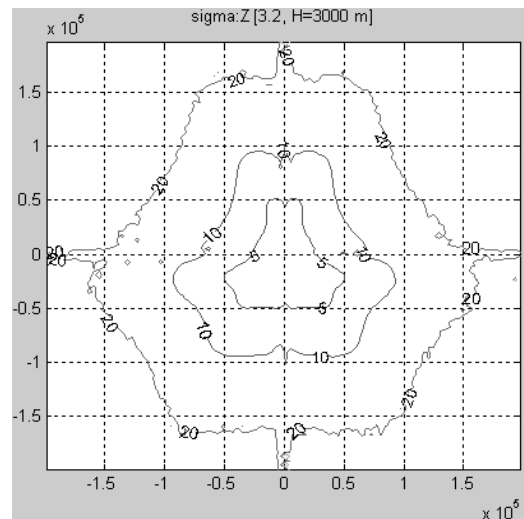


Рис. 4. Абсолютная погрешность определения высоты (конфигурация 3.2)

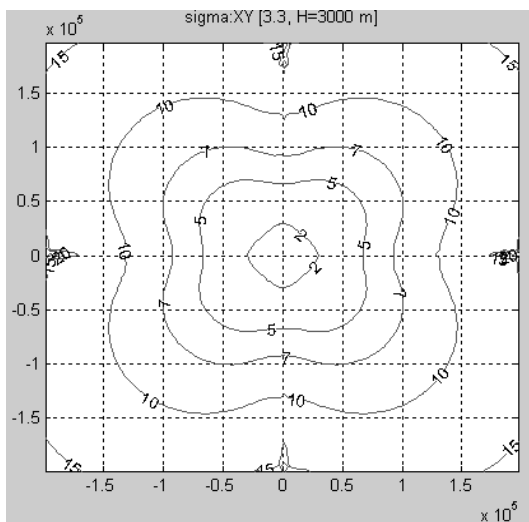


Рис. 5. Абсолютная погрешность определения плоскостных координат (конфигурация 3.3)

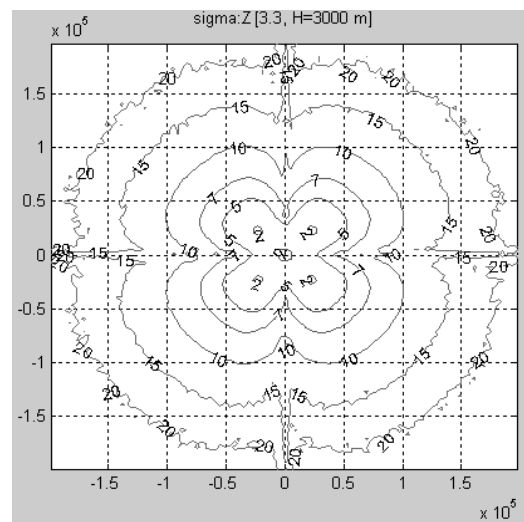


Рис. 6. Абсолютная погрешность определения высоты (конфигурация 3.3)

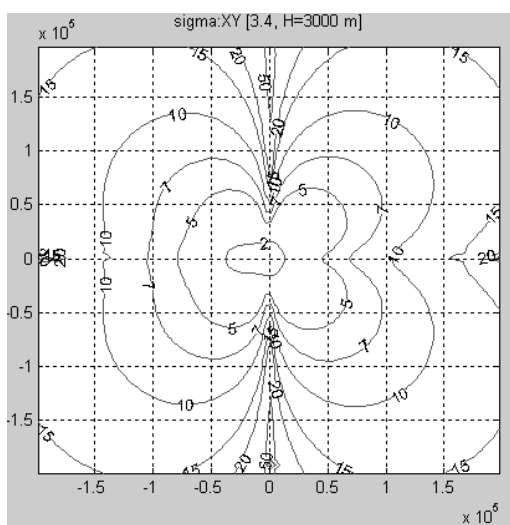


Рис. 7. Абсолютная погрешность определения плоскостных координат (конфигурация 3.4)

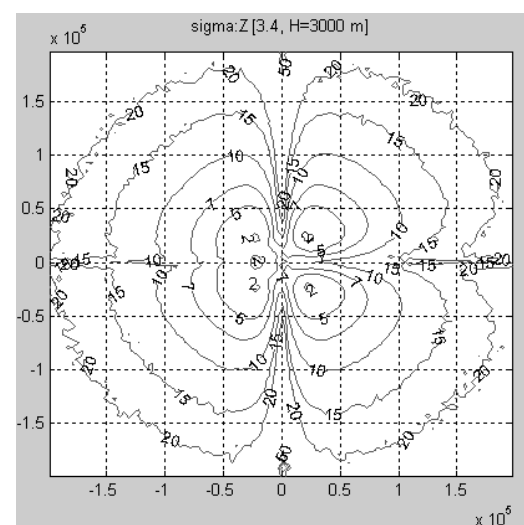


Рис. 8. Абсолютная погрешность определения высоты (конфигурация 3.4)

Конфигурация 3.4, представляющая собой систему со смещенным центром, наиболее эффективна в том случае, если необходимо повысить точность определения местоположения в определенной зоне. Дальнейшее повышение точности достижимо при введении избыточности в систему (добавление новых станций).

Конфигурация 3.1 не позволяет достичь высокой точности определения координат, поэтому неприменима для зон предпосадочного маневрирования и тем более аэродромных зон.

Следующим этапом работы является исследование статистических параметров алгоритмов, получение законов распределения ошибок, а также синтез оптимального алгоритма мультilaterационной обработки.

Литература

1. Li Wan Chun. *A robust TDOA-based location method and its performance analysis* / Li Wan Chun, Wei Ping, Xiao Xianci // *Science in China Press*. – 2009.

2. So, Hing Cheung. *Constrained Location Algorithm Using TDOA Measurements* / Hing Cheung So, Shun Ping Hui // *IEICE Trans. Fundamentals*. – 2003. – Vol. E86-A, No.12. – December.

3. *Real-Time Passive Source Localization: A Practical Linear-Correction Least-Squares Approach* / Y. Huang, J. Benesty, G. Elko, R. Mersereau // *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*. – 2001. – Vol. 9, No 8. – November.

4. Torrieri, Don J. *Statistical Theory of Passive Location Systems* / Don J. Torrieri // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. – 1984. – Vol. AES-20, No 2. – March.

5. Bucher, R. *A Synthesizable VHDL Model of the Exact Solution for Three-dimensional Hyperbolic Positioning System* / R. Bucher, D. Misra. – *VLSI Design*. – 2002. – Vol. 15 (2).

6. Chan, Y.T. *A simple and efficient estimator for hyperbolic location* / Y.T. Chan, K.C. Ho // *IEEE Trans. Signal Process.* – 1994. – Vol. 42, № 8.

Поступила в редакцию 13 апреля 2012 г.