УДК 621.396.96

DOI:10.36815/2073-8250-2020-256-1-17-26

СЛЕДЯЩИЙ ФИЛЬТР ДЛЯ РЛС, ПОСТРОЕННОЙ НА НИТРИД-ГАЛЛИЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Г.А. Валихин

Тульский государственный университет, 300012, г. Тула, проспект Ленина, 92

Статья посвящена проблемам обнаружения и сопровождения целей, флуктуации ЭПР которых описываются третьим случаем Сверлинга, в РЛС, построенной на нитрид-галлиевой технологии. Разработана система фильтров Калмана, позволяющая инициировать траектории целей, уточнять координаты их нахождения, устанавливать границы перемещения, учитывать характеристики усилительных приборов из состава РЛС, а также компенсировать пропуски цели, связанные с флуктуацией её ЭПР.

Ключевые слова: нитрид-галлиевая технология, радиолокационная станция, следящий фильтр, фильтр Калмана, флуктуации ЭПР

Сведения об авторах: Валихин Глеб Алексеевич, аспирант, tulaglebvalihin@yandex.ru

TRACKING FILTER FOR RADAR SYSTEMS BASED ON GALLIUM NITRIDE TECHNOLOGY

G.A. Valikhin

Tula State University, Russia, 300012, Tula, Lenin avenue, 92

This article is dedicated to the issues with detecting and tracking of targets, RCS fluctuations of which are described by the third case of Swerling, of radar systems based on gallium nitride technology. Authors describe the newly designed system of Kalman filters, which allows to set target trajectories, specify target coordinates, determine the area of movement, take into account the parameters of radar system power amplifiers, and also compensate for the target losses associated with the RCS fluctuation.

Keywords: gallium nitride technology, radar system, tracking filter, Kalman filter, RCS fluctuations

Data on authors: Valikhin Gleb Alekseevich, post-graduate student, tulaglebvalihin@yandex.ru

Введение

В современных радиолокационных системах всё большее значение придаётся точности определения координат цели с флуктуирующей ЭПР. К таким целям относятся беспилотные летательные аппараты и цели, движущиеся по баллистической траектории. Традиционно данная задача решалась конструктивно – путём увеличения СВЧ мощности выходного прибора, что негативно влияло на массогабаритные характеристики радиолокатора и его эксплуатационную надёжность. Учитывая необходимость уменьшения массы и габаритов РЛС, а также уровень развития вычислительных и электронных систем, все большее значение для решения данной задачи приобретает вторичная обработка результатов обнаружения и построение активной фазированной антенной решётки на основе современных твердотельных усилителей. Вторичная обработка информации реализуется в цифровом виде созданием комплексной системы следящих фильтров, при этом эффективность фильтрации напрямую связана с отношением сигнал/шум в приёмнике радиолокационной станции. Согласно [1], применение нитрид-галлиевых усилительных приборов в качестве выходных усилительных модулей АФАР и МШУ позволяет достичь увеличения энергетического потенциала РЛС, её помехоустойчивость и стабильность выходной мощности в диапазоне температур. Таким образом, для решения задачи увеличения точности обнаружения целей в радиолокационной станции необходимо разработать комплексную систему следящих фильтров, учитывающую параметры перспективных нитрид-галлиевых усилительных приборов.

Методика расчёта

На настоящий момент задача аппроксимации траектории движения цели решается путём применения метода наименьших квадратов и альфа-бета фильтрации. Традиционные методы аппроксимации траектории влекут за собой ряд недостатков, ограничивающих их применение в области сопровождения маневрирующих целей с флуктуирующей ЭПР и снижающих точность определения координат цели [2]:

1. Коэффициенты усиления фильтров статичны и не могут быть адаптированы к разным значениям параметров движения цели, что увеличивает систематическую ошибку аппроксимации траектории движения цели.

2. Отсутствуют механизмы компенсации ложной корреляции динамических параметров цели, что снижает точность определения координат цели.

3. Пропуски в обнаружении цели за счёт флуктуации её ЭПР влекут за собой уменьшение стабильности фильтра [3].

4. Фильтры не учитывают динамически изменяющиеся энергетические параметры РЛС, а также параметры усилительных устройств из её состава.

Данные недостатки устраняются путём фильтрации показаний радиолокатора при помощи системы фильтров Калмана [4]. Фильтр Калмана является линейной оценочной функцией параметров цели, минимизирующей дисперсию ошибки определения параметров цели при условии точного моделирования её динамических параметров и характеристик радиолокационного устройства. Описанная в настоящей статье система фильтров Калмана позволяет учитывать в своей работе параметры выходных усилительных приборов РЛС и малошумящих усилителей, определяющих энергетиче-

ческий потенциал станции и потенциальную ошибку определения координат цели.

Современные радиолокационные системы охраны объектов и разведки огневых позиций должны обеспечивать обнаружение не только наземных и надводных целей, но и низколетящих БПЛА, а также целей, движущихся по баллистической траектории. Учитывая это, целесообразно рассмотреть применение трёхкоординатной системы следящих фильтров Калмана для аппроксимации траектории движения данного вида целей.

Согласно [2], ЭПР выбранных целей относится к третьему типу Сверлинга, а его флуктуации могут быть описаны уравнением

$$P_d = \exp\left(\frac{-Vt}{1+n_p SNR/2}\right) \left(1 + \frac{2}{np SNR}\right)^{np-2} \times \left(1 + \frac{Vt}{1+n_p SNR/2} - \frac{2}{n_p SNR}(np-2)\right), \quad (2)$$

где P_d – вероятность обнаружения; Vt – порог обнаружения цели; np – количество интервалов когерентного накопления; SNR – отношение сигнал/шум.

Зависимость вероятности обнаружения от отношения сигнал/шум при заданной вероятности ложной тревоги отображена на рис. 1 и будет использована в дальнейшем для моделирования исходной информации, поступающей на следящий фильтр.

Согласно рис. 1, при отношении сигнал/шум 14 дБ, традиционно используемом РЛС РНДЦ для обнаружения наземных целей, вероятность обнаружения целей с флуктуирующей ЭПР составит не более 0,6. Увеличение вероятности обнаружения цели до 0,9 потребует увеличения энергетического потенциала изделия на 5 дБ или снижения вероятности ложной тревоги до 10^{-4} . Изменение энергетического потенциала за счёт применения мощного выходного прибора РЛС приведёт к росту массогаба-

$$p(\sigma) = \frac{4\sigma}{\sigma_{av}^2} \cdot \exp\left(\frac{-2\sigma}{\sigma_{av}}\right), \quad (1)$$

где σ_{av} – среднее значение ЭПР цели ($0,01 \text{ м}^2$).

В общем случае при наличии флуктуации для достижения более высоких отношений вероятностей обнаружения необходимы более высокие значения отношения сигнал/шум, а для низких вероятностей обнаружения – меньшие отношения сигнал/шум, чем для нефлуктуирующих сигналов. Зависимость вероятности обнаружения от отношения сигнал/шум для целей, ЭПР которых флуктуирует по третьему типу Сверлинга, описывается выражением

ритных характеристик РЛС и уменьшению её эксплуатационной надёжности, а высокий уровень ложной тревоги накладывает высокие требования к точности выставления окна следящего фильтра.

Таким образом, для наиболее эффективной аппроксимации траектории движения цели с флуктуирующей ЭПР целесообразно использовать в РЛС технологии АФАР, основанной на твердотельных оконечных нитрид-галлиевых усилительных каскадах. Применение во вторичной системе обработки информации РЛС матричной системы фильтров Калмана позволит избежать увеличения массогабаритных характеристик РЛС за счёт компенсации пропусков цели, выставления оптимального окна работы следящего фильтра и учёта в своей работе динамически изменяющегося энергетического потенциала РЛС. Согласно [4], алгоритм работы фильтра Калмана описывается следующей последовательностью выражений:

Рис. 1

Зависимость вероятности обнаружения цели, флуктуирующей по третьему типу Сверлинга, от отношения сигнал/шум

1. При обнаружении цели в секторе сканирования радиолокатор передаёт её координаты в систему вторичной обработки, которая делает предсказание о её положении при следующем сканировании исходя из

$$X_{n+1,n}^* = \Phi X_{n,n}^*, \quad (3)$$

где X^* – предсказанное положение цели; Φ – матрица изменения состояния цели.

2. При повторном обнаружении цели происходит фильтрация показаний РЛС уравнением

$$X_{n,n}^* = X_{n,n-1}^* + H_n(Y_n - MX_{n,n-1}^*), \quad (4)$$

где H_n – матрица весовых коэффициентов; Y_n – матрица обнаруженных координат цели; M – матрица соответствия обнаружений РЛС с производными состояния цели.

3. Обновляются весовые коэффициенты фильтра согласно формуле

$$H_n = S_{n,n-1}^* M^T (R_n + MS_{n,n-1}^* M^T)^{-1}, \quad (5)$$

где $S_{n,n-1}^*$ – матрица ошибок слеящего фильтра;

$$S_{1,1} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2(R) & \sigma_x \sigma_{\dot{x}} & \sigma_x \sigma_y & \sigma_x \sigma_{\dot{y}} & \sigma_x \sigma_z & \sigma_x \sigma_{\dot{z}} & \sigma_x \sigma_z \\ \sigma_x \sigma_{\dot{x}} & \sigma_{\dot{x}}^2(R) & \sigma_{\dot{x}} \sigma_y & \sigma_{\dot{x}} \sigma_{\dot{y}} & \sigma_{\dot{x}} \sigma_z & \sigma_{\dot{x}} \sigma_{\dot{z}} & \sigma_{\dot{x}} \sigma_z \\ \sigma_y \sigma_x & \sigma_y \sigma_{\dot{x}} & \sigma_y^2(R) & \sigma_y \sigma_{\dot{y}} & \sigma_y \sigma_z & \sigma_y \sigma_{\dot{z}} & \sigma_y \sigma_z \\ \sigma_{\dot{y}} \sigma_x & \sigma_{\dot{y}} \sigma_{\dot{x}} & \sigma_{\dot{y}} \sigma_y & \sigma_{\dot{y}}^2(R) & \sigma_{\dot{y}} \sigma_z & \sigma_{\dot{y}} \sigma_{\dot{z}} & \sigma_{\dot{y}} \sigma_z \\ \sigma_z \sigma_x & \sigma_z \sigma_{\dot{x}} & \sigma_z \sigma_y & \sigma_z \sigma_{\dot{y}} & \sigma_z^2(R) & \sigma_z \sigma_{\dot{z}} & \sigma_z \sigma_z \\ \sigma_z \sigma_{\dot{x}} & \sigma_z \sigma_{\dot{y}} & \sigma_z \sigma_y & \sigma_z \sigma_{\dot{y}} & \sigma_z \sigma_z & \sigma_z^2(R) & \sigma_z \sigma_z \\ \sigma_z \sigma_x & \sigma_z \sigma_{\dot{x}} & \sigma_z \sigma_y & \sigma_z \sigma_{\dot{y}} & \sigma_z \sigma_z & \sigma_z \sigma_{\dot{z}} & \sigma_z^2(R) \end{bmatrix} \quad (6),$$

где значения типа $\sigma\sigma$ – ковариации между двумя величинами, связанными в случае обнаружения их радиолокационной станцией в сферической системе координат.

R_n – динамически меняющаяся матрица ошибок РЛС, связанная с характеристиками усилительных приборов и, как следствие, с энергетическим потенциалом РЛС, определяется выражением

$$R_n = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 \\ \sigma_y^2 \\ \sigma_z^2 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$ – дисперсия определения трёхмерных координат цели.

4. Обновляется матрица ошибок следящего фильтра по формуле

$$S_{n-1,n-1}^* = (I - H_{n-1}M)S_{n-1,n-2}^*, \quad (8)$$

где I – единичная матрица; H – матрица весовых коэффициентов следящего фильтра;

$$H_n = \begin{bmatrix} g_{xn} & 0 & 0 \\ \frac{h_{xn}}{T} & 0 & 0 \\ 0 & g_{yn} & 0 \\ 0 & \frac{h_{yn}}{T} & 0 \\ 0 & 0 & g_{zn} \\ 0 & 0 & \frac{h_{zn}}{T} \\ 0 & 0 & \frac{2k_{zn}}{T^2} \end{bmatrix} \quad (9),$$

5. Прогнозируется матрица ошибок следящего фильтра по формуле

$$S_{n,n-1}^* = \Phi S_{n-1,n-1}^* \Phi^T + Q_n, \quad (10)$$

где Q_n – ковариация вектора шума динамической модели движения цели.

6. В случае отсутствия обнаружения цели при сканировании происходит предсказание будущего положения цели по формуле (3), значения весовых коэффици-

ентов и матрицы ошибок следящего фильтра остаются неизменными.

Учёт влияния динамически изменяющегося энергетического потенциала РЛС и характеристик усилительных приборов в разработанной системе фильтрации осуществляется за счёт первичной матрицы ошибок следящего фильтра $S_{1,1}$ и матрицы ошибок радиолокационной станции R_n . Рассмотрим эффективность работы комплексной матричной системы следящих фильтров при применении в РЛС нитрид-галлиевых и арсенид-галлиевых усилительных элементов. В качестве нитрид-галлиевого входного усилительного прибора применим малошумящий усилитель М421353-2 АПНТ.434810.137. Согласно [1], его применение вместо арсенид-галлиевого усилителя позволит повысить чувствительность РЛС на 2 дБ, увеличив её энергетический потенциал. Применение в качестве выходного усилительного прибора нитрид-галлиевого усилителя М421351 АПНТ.434810.137, согласно [1], позволит дополнительно увеличить энергетический потенциал РЛС на 3 дБ за счёт увеличения выходной мощности усилительного прибора. При этом мощность потребления РЛС будет неизменна, поскольку коэффициент полезного действия ППМ на нитрид-галлиевых усилителях также больше на 3 дБ, чем на арсенид-галлиевых. Влияние энергетического потенциала РЛС на потенциальную точность определения положения цели при её моноимпульсной пеленгации определяется выражением

$$\sigma_\theta(R) = \frac{0.5 \cdot \theta_{0.5}}{\sqrt{\frac{S}{N}}(R)}, \quad (11)$$

где $(\sigma_\theta(R))$ – ошибка определения направления на цель от расстояния до неё; $\theta_{0.5}$ –

ширина диаграммы направленности по уровню 0,5; $\frac{S}{N}(R)$ – отношение сигнал/шум РЛС.

Согласно выражению (11), общее увеличение отношения сигнал/шум РЛС, достигнутое за счёт применения усилительных приборов на нитриде галлия 5 дБ, позволит уменьшить потенциальную ошибку определения направления на цель в 1,8 раза. Проведём математическое моделирование точности обнаружения цели разработанной системой следящих фильтров и оценим влияние потенциальной ошибки на итоговую точность аппроксимации положения цели.

Результаты

В качестве исходных данных для работы следящего фильтра зададим баллистическую траекторию движения цели с учётом сопротивления воздуха. Для упрощения вычислений примем допущение, заключающееся в том, что цель начала свое движение из нуля декартовой системы координат под углом 45° к каждой из осей с линейной скоростью 270 м/с. Среднеквадратические ошибки определения координат цели радиолокатором примем равными 100 м по каждой из координат для РЛС с арсенид-галлиевыми усилительными приборами, а период обновления информации о цели – 10 мс. Реальная траектория цели и показания РЛС приведены на рис. 2 и 3 соответственно.

Рис. 2
Реальная траектория движения цели

Рис. 3

Показания РЛС при применении в её составе традиционных (а) и нитрид-галлиевых (б) усилительных приборов

Рис. 4

Реальная траектория движения цели (а) и результаты работы следящего фильтра при использовании в РЛС традиционных (б) и нитрид-галлиевых (в) усилительных приборов

Данные, приведённые на рис. 3, показывают, что применение нитрид-галлиевых усилительных приборов позволяет уменьшить потенциальную ошибку определения координат цели радиолокационной станцией, при этом устойчивое сопровождение цели РЛС с заданными ошибками определения прямоугольных координат без использования следящего сглаживающего фильтра не представляется возможным. Проведём фильтрацию данных рис. 3 фильтром Калмана, метод работы которого приведён выше, и свведём результаты работы фильтра на рис. 4.

Резкие изменения положения цели на начальном участке полёта после её прохождения через следящий фильтр объясняются высокими ошибками фильтрации при начале завязки фильтром траектории

движения. Согласно рис. 4, следящий фильтр стабилизирует выходные значения быстрее при применении в РЛС нитрид-галлиевых усилительных приборов, что связано с меньшим значением потенциальной ошибки определения координат цели. Среднеквадратическое отклонение ошибки определения координат цели может быть найдено в ходе анализа квадратного корня из значений матрицы ошибок следящего фильтра S_n^* . Зависимость СКО следящего фильтра по определению высоты полёта цели от количества обнаружений цели приведена на рис. 5.

Анализ матрицы ошибок следящего фильтра позволяет оценить необходимое количество обнаружений цели для достижения заданной ошибки определения координат цели. Так, например, согласно рис. 5,

Рис. 5

Зависимость СКО определения высоты цели от количества её обнаружений при использовании в РЛС традиционных (а) и нитрид-галлиевых (б) усилительных приборов

для достижения ошибки определения высоты цели 10 м достаточно получить информацию о 120 и 398 обнаружениях цели при использовании в РЛС нитрид-галлиевых и арсенид-галлиевых приборов соответственно. Таким образом, увеличение потенциальной точности определения координат цели за счёт применения перспективных усилительных приборов в 1,8 раза позволяет уменьшить количество обнаружений цели, необходимое для аппроксимации её текущей позиции в 3,32 раза. Это объясняется влиянием ошибок определения линейных скоростей и ускорений цели РЛС, которые напрямую связаны с потенциальной точностью определения координат цели.

Стоит отметить, что одного лишь увеличения энергетического потенциала РЛС за счёт применения перспективных усилительных приборов и учёта их выход-

ных параметров недостаточно для стабилизации системы следящих фильтров, поскольку существенный вклад в ошибку определения положения цели вносит нестабильность её динамических параметров. Для рассмотренного выше примера данная нестабильность динамических параметров обусловлена влиянием сопротивления воздуха на траекторию движения цели и отслеживается фильтром, используя ковариацию вектора шума динамической модели движения цели Q_n . Для определения высоты цели составляющая Q_n будет равна дисперсии динамики цели, которая может быть найдена из

$$\sigma_u^2 = \left(\frac{T \cdot \ddot{z}_{\max}}{B} \right)^2, \quad (12)$$

где T – время обновления информации о цели; $\ddot{z}_{\max}$ – максимально ожидаемое ускорение цели в заданной плоскости сопровожде-

Рис. 6

Реальная траектория движения цели на нисходящем участке (а) и результаты следящей фильтрации без учёта влияния ковариации вектора шума динамической модели движения цели (б) и с ним (в)

ния; B – безразмерный коэффициент. Согласно [3], для сопровождения баллистических целей выбирается равным 1, что позволяет минимизировать значение систематической ошибки определения координаты цели.

Результаты работы следящего фильтра в плоскости Z с учётом ковариации вектора шума динамической модели движения цели и без него приведены на рис. 6.

Согласно рис. 6, учёт ковариации вектора шума динамической модели движения цели позволяет серьезно уменьшить ошибку определения прямоугольных координат точки падения цели на 40 м.

Заключение

Таким образом, использование для обнаружения целей с флуктуирующей ЭПР следящего фильтра Калмана, алгоритм работы которого описан в данной статье, позволяет:

1. Предсказывать положение цели при следующем обзоре РЛС и через заданное время после срыва сопровождения.
2. Уменьшить потенциальную ошибку обнаружения цели.
3. Уменьшить порог обнаружения цели и увеличить вероятность её обнаружения за счёт исключения возможности завязки траектории шумовой составляющей.
4. Учитывать параметры усилительных приборов РЛС.

При проектировании следящего фильтра особое внимание следует уделять ковариации вектора шума динамической модели движения цели и характеристикам РЛС. Правильный выбор данного параметра позволяет компенсировать влияние на траекторию движения цели факторов, не учтённых при составлении уравнения фильтрации позиции цели, но влияющих на её положение, – сопротивление воздуха, скорость ветра.

Использование в РЛС перспективных нитрид-галлиевых усилительных приборов и настройка следящего фильтра в соответствии с их параметрами позволяют уменьшить время, необходимое для слежения за целью, более чем в 3 раза и тем самым существенно увеличить пропускную способность.

Литература

1. Груздов, В.В. Нитрид-галлиевая электроника для космических систем / В.В. Груздов, Ю.В. Колковский // Радиопромышленность. – 2016. – № 3. – С. 48–54.
2. Merrill I. Skolnik Radar Handbook. Boston, Massachusetts. McGraw-Hill, 1990. ISBN 0-07-057913-X.
3. Bassem R. Mahafza, Radar systems analysis and design using Matlab. Chapman & Hall/CRC, 2000, 533 p. ISBN 1-58488-182-8.
4. Eli Brookner Tracking and Kalman Filtering made Easy. Wiley-Interscience, 1998. 504 p. ISBN 10: 0471184071.

References

1. Gruzдов V.V., Kolkovskiy Yu.V. Nitrid-galliyevaya elektronika dlya kosmicheskikh sistem [Gallium nitride electronics for space applications]. Radiopromyshlennost', 2016, no. 3, pp. 48-54.
2. Merrill I. Skolnik. Radar handbook. Boston, Massachusetts, McGraw-Hill, 1990. ISBN 0-07-057913-X.
3. Bassem R. Mahafza, Radar systems analysis and design using Matlab. Chapman & Hall/CRC, 2000, 533 p. ISBN 1-58488-182-8.
4. Eli Brookner. Tracking and Kalman filtering made easy. Wiley-Interscience, 1998, 504 p. ISBN 10: 0471184071.