

ОЦЕНКА ВЫСОТЫ ЦЕЛИ В РАДИОЛОКАТОРАХ МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН

Пахотин В.А., д.ф.-м.н., профессор Института физико-технических наук и информационных технологий Балтийского федерального университета им. И. Канта (БФУ им. И. Канта), e-mail: VPakhotin@kantiana.ru;

Симонов Р.В., аспирант Института физико-технических наук и информационных технологий (БФУ им. И. Канта);

Власова К.В., к.ф.-м.н., доцент Балтийской государственной академии ПФ, e-mail: p_ksenia@mail.ru;

Бессонов В.А., к.ф.-м.н., доцент Института физико-математических наук и информационных технологий (БФУ им. И. Канта), e-mail: VBessonov@kantiana.ru.

ASSESSMENT OF HEIGHT OF THE PURPOSE IN RADARS OF METER WAVE BAND

Pakhotin V. A., Simonov R. V., Vlasova K. V., Bessonov V. A.

The problem of assessment of height of the purpose in radars of meter wave band connected with an interference of a straight line and reflected from the Earth's surface by waves is considered. In the field of small corners of the place of the directional pattern for a straight line and the reflected wave merge together and significantly distort estimates of corners of the place of the purpose (purpose height). The possibility of the solution of a problem of assessment of corners of the place (purpose height) is analyzed by three methods: by the method of the angular spectral analysis, by method based on the credibility equations, by method of maximum likelihood with the high resolution developed in BFU of I. Kant. Results of model researches of potential opportunities of estimates of corners of the place (purpose height) are presented by three methods. It is shown that the method of maximum likelihood with high resolution has no systematic interferential errors of estimates of corners of the place, both in the field of small correlation, and in the field of big correlation of a straight line and reflected waves. This method together with accounting of a tropospheric refraction solves a purpose height assessment problem at ranges to distance of direct visibility at the relation signal/noise ≈ 30 dB.

Key words: radar-tracking systems, method of maximum likelihood, angular spectral analysis, assessment of corners of the place, purpose height.

Ключевые слова: радиолокационные системы, метод максимального правдоподобия, угловой спектральный анализ, оценка углов места.

Введение

Современные радиолокационные системы (РЛС) являются сложными радиотехническими устройствами, предназначенными для оценки координат воздушных целей. Однако, если азимут и дальность до цели оцениваются в них вполне удовлетворительно, то угол места цели и связанная с ним высота цели, оцениваются неудовлетворительно. Это обусловлено техническим ограничением, связанным с размером вертикальной составляющей антенной системы. Для радиоволн с длиной волны около метра и более сложно создать узкие по ширине диаграммы направленности в вертикальной (угломестной) плоскости. В результате при малых углах места диаграммы направленности для прямой волны и волны, отраженной от поверхности земли, частично перекрываются. В этих условиях, используемый в современных РЛС метод углового спектрального анализа приводит к существенным систематическим погрешностям, которые при пересчете в погрешности высоты цели могут достигать 50 % и более. При этом реальная дальность РЛС, при которой можно оценивать высоту воздушной цели оказывается ограниченной областью малой корреляции прямой и отраженной волн, когда критерий разре-

Рассмотрена проблема оценки высоты цели в радиолокаторах метрового диапазона волн, связанная с интерференцией прямой и отраженной от поверхности земли волнами. В области малых углов места диаграммы направленности для прямой и отраженной волны сливаются вместе и существенно искажают оценки углов места цели (высоты цели). Анализируется возможность решения задачи оценки углов места (высоты цели) тремя методами: методом углового спектрального анализа, методом, основанным на уравнениях правдоподобия, методом максимального правдоподобия с высоким разрешением, разработанным в БФУ им. И. Канта. Представлены результаты модельных исследований потенциальных возможностей оценок углов места (высоты цели) тремя методами. Показано, что метод максимального правдоподобия с высоким разрешением не имеет систематических интерференционных погрешностей оценок углов места, как в области малой корреляции, так и в области большой корреляции прямой и отраженной волн. Данный метод совместно с учетом тропосферной рефракции решает проблему оценки высоты цели при дальностях до расстояния прямой видимости при отношении сигнал/шум ≈ 30 дБ.

шения Рэлея выполняется. Например, при высоте цели 10 км эта дальность равна всего 100 км при расстоянии прямой видимости 350 км.

Второй причиной не удовлетворительных оценок углов места (высоты цели) является взаимное подавление диаграмм направленности для прямой и отраженной волны. При этом отношение сигнал/шум, при стремлении угла места к нулю, стремится к нулевому значению. Расстояние прямой видимости в современных локаторах

оказывается недостижимым. Обнаружение сигнала, отраженного от цели, и оценка его параметров возможна на дальностях, отличающихся от расстояния прямой видимости на 100 и более км.

Целью настоящей работы является исследование потенциальных возможностей оценки углов места воздушных целей (высоты цели) тремя методами: методом углового спектрального анализа [1] методом, основанном на уравнениях правдоподобия [2, 3], методом максимального правдоподобия, основанным на анализе поверхности функционала правдоподобия [4, 5]. В работе предполагается учесть явление тропосферной рефракции для увеличения предельной дальности РЛС при оценке параметров сигнала [7].

Основы теории

Рассмотрим основные положения теории, определяющей оценку углов места (высоты) воздушных целей. Для определенности примем в качестве антенной системы многоканальную антенную систему существующей РЛС «Резонанс» [8, 9] с небольшими конструктивными изменениями, увеличивающими эффективность оценки параметров сигнала. Она представляет собой совокупность 64-х вертикальных линеек элементарных вибраторов, равномерно распределенных по периметру квадрата со стороной 34,5 м. Каждая линейка содержит 10 элементарных вибраторов (ее длина 25 м). Положение элементарных вибраторов в пространстве определяется радиус-вектором $\bar{R}_{n,m,k}$, индексы которого определяют номер вибратора вдоль осей x, y, z . Запишем принятую реализацию на отдельном вибраторе в виде

$$\hat{Y}_{n,m,k} = \hat{U}_1 \exp(-i(\bar{k} \bar{R}_{n,m,k})) + \hat{U}_2 \exp(i(\bar{k} \bar{R}_{n,m,k})) + \hat{U}_{ш n,m,k}, \quad (1)$$

где \hat{U}_1, \hat{U}_2 – комплексные вертикальные составляющие напряженности поля для прямой и отраженной волны, $\hat{U}_2 = \hat{U}_1 \hat{F}$, \hat{F} – комплексный коэффициент отражения Френеля для вертикальной составляющей поля, \bar{k} – волновой вектор прямой волны, $\hat{U}_{ш n,m,k}$ – нормальный шум в точке пространства с дисперсией σ^2 , средним значением квадратурных составляющих, равным нулю, и интервалом корреляции τ_k .

На основании выражения (1) запишем функционал правдоподобия в виде [7].

$$\Delta \left(\hat{U}_1, \hat{U}_2, \bar{k} \right) = \sum_{n,m,k} \left| \hat{Y}_{n,m,k} - \hat{U}_1 \exp \left(-i \left(\bar{k} \bar{R}_{n,m,k} \right) \right) - \hat{U}_2 \exp \left(i \left(\bar{k} \bar{R}_{n,m,k} \right) \right) \right|^2. \quad (2)$$

Штрихами отмечены неизвестные оцениваемые параметры сигнала. Дифференцируя (2) по \hat{U}_1 и \hat{U}_2 и, приравнявая дифференциалы нулю, можно получить уравнения правдоподобия. Решая эти уравнения, получим функциональные зависимости, определяющие раздельные диаграммы направленности для прямой и отраженной волн.

$$\hat{U}_1(\bar{k}) = \frac{1}{NMK} \sum_{n,m,k} \left(\hat{Y}_{n,m,k} \right) \frac{f1(\bar{k})}{1 - \left| \hat{R}(\bar{k}) \right|^2};$$

$$\hat{U}_2(\bar{k}) = \frac{1}{NMK} \sum_{n,m,k} \left(\hat{Y}_{n,m,k} \right) \frac{f2(\bar{k})}{1 - \left| \hat{R}(\bar{k}) \right|^2};$$

$$f1(\bar{k}) = \exp \left(i \left(\bar{k} \bar{R}_{n,m,k} \right) \right) - \hat{R}(\bar{k}) \exp \left(-i \left(\bar{k} \bar{R}_{n,m,k} \right) \right);$$

$$; f2(\bar{k}) = \exp \left(-i \left(\bar{k} \bar{R}_{n,m,k} \right) \right) - \hat{R}^*(\bar{k}) \exp \left(i \left(\bar{k} \bar{R}_{n,m,k} \right) \right);$$

$$\hat{R}(\bar{k}) = \frac{1}{K} \sum_k \exp(2i(\bar{k} \bar{R}_{n,m,k})), \quad (3)$$

где N, M, K – количество элементарных вибраторов вдоль осей X, Y, Z , $\hat{R}(\bar{k})$ – комплексный коэффициент

корреляции между прямой и отраженной волной.

Преобразуем функционал правдоподобия (2), используя предложение К. Хелстрема [6]. Необходимость преобразования связана с тем, что поверхность функционала правдоподобия (2) имеет большое количество локальных минимумов, среди которых сложно найти глобальный минимум. Согласно К. Хелстрому, подставим (3) в выражение (2). В этом случае функционал правдоподобия будет зависеть лишь от волнового вектора \bar{k} и исключаются локальные минимумы его поверхности. Дополнительно возведем полученное выражение в квадрат и преобразуем с учетом (3) к функционалу следующего вида.

$$\Delta 1 \left(\bar{k} \right) = \sum_{n,m,k} \left| \hat{Y}_{n,m,k} \right|^2 - \quad (4)$$

$$- \sum_{n,m,k} \left| \hat{U}_1(\bar{k}) \exp \left(-i \left(\bar{k} \bar{R}_{n,m,k} \right) \right) - \hat{U}_2(\bar{k}) \exp \left(i \left(\bar{k} \bar{R}_{n,m,k} \right) \right) \right|^2.$$

Преобразованный функционал правдоподобия (4) имеет ясный физический смысл. Он является разностью мощности, принимаемой на вибраторах совокупности сигнала и шума и мощностью копии сигнала. В точке минимума, при $\bar{k} = \bar{k}$, математическое ожидание от (4) определяет дисперсию шума в принятой реализации

$$M \left(\Delta 1 \left(\bar{k} = \bar{k} \right) \right) = \sigma^2 NMK. \quad (5)$$

Для получения диаграммы направленности антенной системы в методе углового спектрального анализа, запишем функционал правдоподобия (2) в другом виде.

$$\Delta \left(\hat{U}_0, \bar{k} \right) = \sum_{n,m,k} \left| \hat{Y}_{n,m,k} - \hat{U}_0 \exp \left(-i \left(\bar{k} \bar{R}_{n,m,k} \right) \right) \right|^2. \quad (6)$$

В этом выражении принятой реализации, содержащей прямую и отраженную волну, сопоставляется плоская волна с амплитудой \hat{U}_0 и волновым вектором \hat{k} .

Дифференцируя (6) по \hat{U}_0 и приравнивая дифференциал нулю, получим выражение для диаграммы направленности суммы прямой и отраженной волны.

$$\hat{U}_0(\hat{k}) = \frac{1}{N, M, K} \sum_{n, m, k} \hat{Y}_{n, m, k} \exp\left(i \left(\hat{k} \overline{R}_{n, m, k} \right)\right). \quad (7)$$

Проведем краткий анализ выражений (3), (4), (7). Выражение для диаграммы направленности (7) получено при несоответствии правой и левой частей функционала (6). Следовательно, при наличии в принятой реализации двух и более плоских волн угловой спектральный анализ не является оптимальным методом обработки. В результате выражение (7) характеризуется интерференционным взаимодействием прямой и отраженной волны. Это приводит к систематическим интерференционным погрешностям в оценке параметров сигнала. Выражения (3) для отдельных диаграмм направленности прямой и отраженной волны включают в себя коэффициент корреляции между прямой и отраженной волной. Этим исключается интерференционное взаимодействие между ними. Массив данных на вибраторах при этом преобразуется в два независимых массива данных. Однако наличие в знаменателе значения

$$c - \left| \hat{R}(\hat{k}) \right|^2$$

приводит к появлению ложного максимума в диаграммах направленности в точках $|\hat{R}| = 1$, при угле места $\beta = 0$. Этот ложный максимум не позволяет получать оценки углов места в области малых значений (при высоте цели 10 км, угловой диапазон $0 \div 10$ градусов, дальность $100 \div 350$ км). В первых двух рассмотренных методах критерием отбора решений является максимум диаграммы направленности. В третьем методе, связанным с преобразованным функционалом правдоподобия (4), критерием отбора решений является минимум функционала. Математическое ожидание от (4) в минимуме определяет дисперсию шума (5). Этот критерий является устойчивым критерием, как в области малой корреляции прямой и отраженной волн, когда критерий Рэлея выполняется, так и в области высокой корреляции. Этот метод может быть рекомендован для оценки углов места (высоты цели) в РЛС метрового диапазона.

Рассмотрим вопрос об учете явления тропосферной рефракции при оценке высоты цели с помощью РЛС. Тропосферная рефракция увеличивает угол места цели. Для метрового диапазона волн это увеличение небольшое $\approx 0,5$ градуса. Однако оно существенно увеличивает предельную дальность РЛС при оценке высоты цели. Из геометрии траектории луча можно получить следующее выражение для пересчета оценок углов места и времени приема в оценку высоты цели.

$$H(t_0, \beta) = -R_0 + \sqrt{(ct_0 \sin(\beta) + R_0)^2 + (ct_0 \cos(\beta))^2}, \quad (8)$$

где t_0 – время приема сигнала, β – угол места цели,

c – скорость света, R_0 – радиус земли.

Для учета тропосферной рефракции, как показали исследования, достаточно в (8) заменить радиус земли R_0 на эквивалентный радиус $c_1 = 4/3 R_0$.

Таким образом, учет тропосферной рефракции увеличивает дальность РЛС при оценке высот цели и исключает систематическую погрешность оценки высоты цели, следующую из геометрии.

Результаты модельных исследований

Приведем результаты модельных расчетов, иллюстрирующих возможности оценки углов места, а следовательно, и высоты цели тремя рассмотренными методами. На рис. 1 показана зависимость от угла места модуля коэффициента корреляции между прямой и отраженной волнами. В области высокой корреляции $0 \div 7$ градусов (эквивалентные расстояния до цели $350 \div 100$ км, при высоте цели 10 км) отмечается сильное взаимодействие прямой и отраженной волн. В этой области оценки углов места можно получить лишь методом максимального правдоподобия на основе функционала правдоподобия. В области малой корреляции ($7 \div 85$ градусов) оценки углов места можно получить тремя вышеприведенными методами.

Коэффициент корреляции прямой и отраженной волны

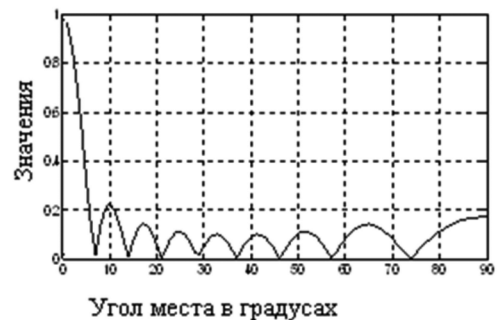


Рис. 1. Зависимость коэффициента корреляции прямого и отраженного от поверхности земли луча от угла места

Суммарная амплитуда прямой и отраженной волны

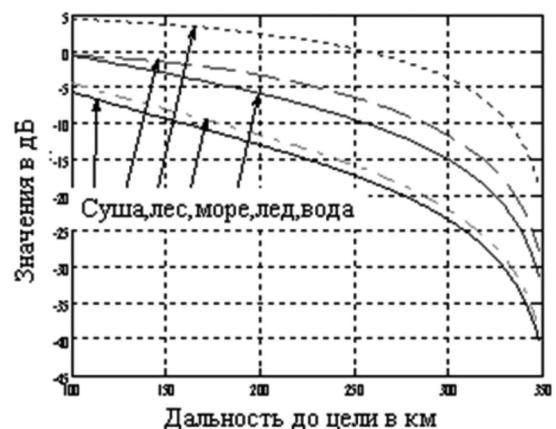


Рис. 2. Зависимость суммарной амплитуды прямой и отраженной волны от дальности до цели, высота цели 10 км

При дальностях более 300 км резко уменьшается суммарная амплитуда прямой и отраженной волны. Это приводит к значительному уменьшению отношения сигнал/шум. Расстояние прямой видимости оказывается недостижимой для РЛС дальностью. Согласно рис. 2, для получения удовлетворительных оценок углов места на расстояниях более 300 км, требуется дополнительное увеличение отношения сигнал/шум, которое для суши достигает 25 дБ. Следует отметить, что необходимое увеличение отношения сигнал/шум достигается за счет увеличения количества вибраторов, за счет повторных излучений, за счет использования сложных сигналов.

На рис. 3 показана оценка углов места методом, на основе уравнений правдоподобия (3). Диаграммы направленности, как для прямой волны, так и для отраженной волны имеют дополнительный максимум в нуле градусов. Согласно данному рисунку, ложный максимум в нуле градусов существенно затрудняет оценку малых углов места.



Рис. 3. Диаграммы направленности антенной системы по углу места. Малые углы места. Модельное значение угла места 10 градусов

На рис. 4. показана суммарная диаграмма направленности прямой и отраженной волн, полученная методом углового спектрального анализа (7). При углах места 5 градусов и меньше отмечается один суммарный максимум диаграммы направленности.



Рис. 4. Двумерная суммарная диаграмма направленности, полученная методом углового спектрального анализа

Модельные значения азимута 20 градусов, угла места 5 градусов. Прямой и отраженный лучи неортогональны, коэффициент корреляции равен 0,35. Оценка угла места 1 градус существенно отличается от модельного значения 5 градусов. На рис. 5 показана поверхность обратного функционала правдоподобия (4)

$$\Delta 2 \left(\frac{\cdot}{k} \right) = \frac{1}{\Delta 1 \left(\frac{\cdot}{k} \right)}$$

пестков, положение максимумов оценивает азимут и углы места прямой и отраженной волн. Уравнения правдоподобия (3) при этих оценках азимута и угла места определяют амплитуды прямой и отраженной волн. Значение максимума оценивает дисперсию шума в принятой реализации (5). Модельные значения азимута 20 градусов, угла места 5 градусов. Решение вполне возможно как в области малой корреляции, так и в области высокой корреляции.

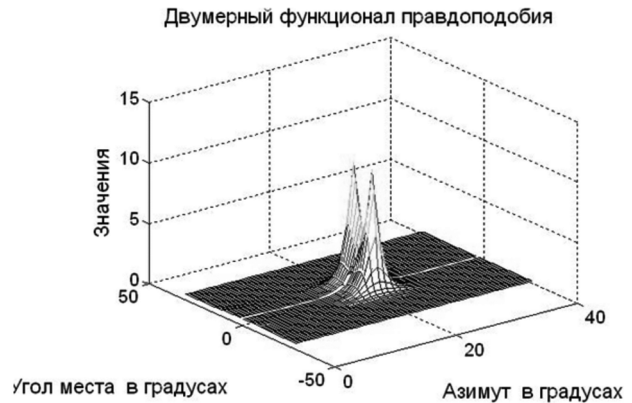


Рис. 5. Поверхность двумерного обратного функционала правдоподобия

На рис. 6 показаны погрешности оценки углов места, полученные методом углового спектрального анализа (7) и методом, основанном на функционале правдоподобия (4). Первый метод приводит к систематическим погрешностям оценок углов места за счет взаимодействия прямой и отраженной от поверхности земли волны. Погрешности существенные. Второй метод (3) имеет лишь случайные погрешности, которые зависят от отношения сигнал/шум и могут быть уменьшены за счет увеличения количества вибраторов, за счет повторных излучений, за счет использования сложных сигналов.



Рис. 6. Погрешности оценок углов места, полученные двумя методами при отношении сигнал/шум 10 дБ. Морская вода

На рис. 7 показаны погрешности оценок углов места при малых углах места, полученные методом углового спектрального анализа (8) и методом, основанном на функционале правдоподобия (4). Как следует из рисун-

ка, угловой спектральный анализ приводит к существенным систематическим погрешностям.

Эти погрешности отсутствуют в методе (4).



Рис. 7. Оценка углов места в области 0-10 градусов. Коэффициент корреляции меняется в пределах 0,99-0,22. Отношение сигнал/шум равно 20 дБ. Сухая земля

При переходе к оценке высоты цели в соответствии с (8) погрешности возрастают. На рис. 8 представлены оценки высоты цели в зависимости от дальности до цели. Оценки высоты цели, полученные методом углового спектрального анализа (7), неудовлетворительные. Оценки, полученные методом, основанном на функционале правдоподобия (4), увеличиваются при увеличении дальности до цели. Исходя из требований точности оценок (≈ 1 км) предельная дальность РЛС при оценке высоты цели равна 260 км.



Рис. 8. Оценка высоты цели в зависимости от дальности. Морская вода. Угол места меняется от 5,5 градуса до 0,6 градуса

При учете тропосферной рефракции предельная дальность оценки высоты цели может быть увеличена до расстояния прямой видимости (350 км при высоте цели 10 км, рис. 9). Кроме того исключаются систематические погрешности в оценке высоты цели.

На рис. 9 показаны оценки высоты цели, полученные двумя структурами РЛС. Первая структура – это существующая РЛС «Резонанс». Она содержит для оценки углов места одну вертикальную линейку вибраторов (15 вибраторов, распределенных по высоте 37,5 м.) Вторая структура РЛС – это объединенная азимутальная и угломестная системы вибраторов с 64-мя вертикальными линейками вибраторов длиной 37,5 м и количеством вибраторов 15. Как видно из рисунка, при второй структуре РЛС погрешность оценки высоты цели не превышает значения 700 м на расстоянии прямой ви-

димости 350 км. В первой структуре отчетливо проявляется систематическое завышение высоты цели, связанное с не учетом тропосферной рефракции.

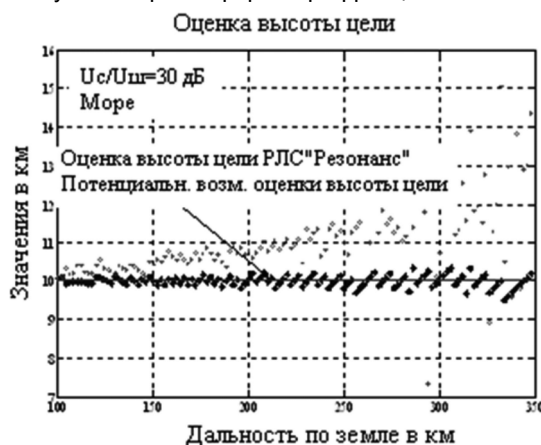


Рис. 9. Сравнение возможностей оценки высоты цели двух структур РЛС

Заключение

Основным результатом настоящей работы являются следующие выводы. Проблема оценки высоты цели по данным РЛС в области метрового диапазона волн может быть решена при выполнении следующих трех условий.

Для обработки данных необходимо использовать метод, основанный на преобразованном функционале правдоподобия, позволяющим решать задачу оценки высоты цели как в области высокой корреляции прямой и отраженной волны, так и в области малой корреляции;

Структура РЛС должна обеспечить требуемое отношение сигнал/шум с учетом существенного его уменьшения в области малых углов места за счет количества вибраторов, за счет сложных сигналов, за счет повторных излучений.

Необходим учет тропосферной рефракции, устраняющий систематическую погрешность и увеличивающий предельную дальность РЛС при оценке высоты цели.

Литература

1. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2004, 320 с.
2. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем: учебное пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2003. – 400 с.
3. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
4. Пахотин В.А., Власова К.В. Решение задачи определения угловых координат объекта методом максимального правдоподобия. Вестник РГУ им. И. Канта. Вып. 4: сер. физико-математические науки. – Калининград: Изд-во РГУ им. И. Канта, 2010. – 173с.
5. Пахотин В.А., Власова К.В., Бессонов В.А., Строков В.И., Бабинович А.И., Шустов Э.И. Технология цифровой обработки простых и широкополосных сигналов на основе функционала правдоподобия. (Пленарное заседание) Доклады 18-й Международной конференции DSPA-2016, серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение. Т. 1, Москва, Россия, с.13-25.
6. Хелстром К. Статистическая теория обнаружения сигналов. К.; Изд-во: М.: Иностранной литературы, 1963.
7. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн, М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 558 с.
8. Военное обозрение.dfpwar.ru
9. Военное обозрение.topwar.ru